

Matheus Hammes Amaral

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DAS  
CORRENTES DO ESTATOR PARA A MEDIÇÃO DE  
ENTREFERROS DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS  
DE COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Carlos Alberto Flesch,  
Dr. Eng.

Florianópolis  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Amaral, Matheus Hammes

Estudo e avaliação de métodos de análise das  
correntes do estator para a medição de entreferros  
de motores de indução monofásicos de compressores  
herméticos / Matheus Hammes Amaral ; orientador,  
Carlos Alberto Flesch, 2017.  
137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Metrologia e  
Instrumentação. 3. Medidas Elétricas, Magnéticas e  
Eletrônicas. 4. Máquinas Elétricas e Dispositivos de  
Potência. 5. Controle de Qualidade. I. Flesch,  
Carlos Alberto. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.

Matheus Hammes Amaral

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DAS  
CORRENTES DO ESTATOR PARA A MEDIÇÃO DE  
ENTREFERROS DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS  
DE COMPRESSORES HERMÉTICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 20 de Abril de 2017.

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr. Eng. – Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEEL

Prof. Saulo Güths, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho aos meus pais, Jorge  
e Márcia, e a meu irmão, Ramon, pelo  
apoio e incentivo na busca pelo sucesso.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Jorge e Márcia, ao meu irmão, Ramon, e à minha esposa Rafaela, pela compreensão e paciência. Sem o estímulo e a torcida de vocês talvez eu não tivesse chegado ao fim desta etapa.

Ao meu orientador, Prof. Carlos Alberto Flesch, pela confiança em mim depositada na seleção para o mestrado, na aceitação do pedido de orientação e na atenção dedicada em todos os momentos que solicitei ao longo da dissertação. Muito obrigado!

Aos meus companheiros da EMBRACO, Leonardo Casagrande (ex-chefe) e Marcelo Joerge Fonseca Costa (atual chefe) por aceitarem que eu trabalhasse durante vários semestres em horário flexível para eu poder cursar as disciplinas necessárias, e assim poder frequentar um programa de mestrado de referência internacional, e a Adelson Machado Ricardo pelo auxílio na preparação das amostras utilizadas nos experimentos. Obrigado pela compreensão de vocês.

À EMBRACO por financiar este trabalho através da flexibilização de meus horários e por me conceder uma bolsa de estudos para auxílio dos custos envolvidos, principalmente com os deslocamentos.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite e pelas importantes contribuições/ajustes sugeridos. Obrigado pela seriedade, interesse e profissionalismo dos senhores frente ao meu trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho e não foram aqui citados.





*“Primary causes are unknown to us;  
but are subject to simple and constant  
laws, which may be discovered by ob-  
servation, the study of them being the  
object of natural philosophy.”*

(Joseph Fourier, 1822)



## RESUMO

Compressores herméticos utilizados em sistemas de refrigeração possuem em seu interior motores elétricos como subsistema responsável por transmitir movimento ao conjunto mecânico. O motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo é o tipo de motor mais empregado em compressores destinados à refrigeração doméstica e comercial leve. Esse tipo de motor possui uma série de características que precisam ser controladas durante o processo produtivo para que sua qualidade seja assegurada. Uma dessas características é a folga radial entre estator e rotor, conhecida na literatura como entreferro. A característica entreferro é uma característica crítica do motor de indução, pois, esta impacta tanto no desempenho quanto na confiabilidade do compressor. Devido a isso, 100% da produção dos motores monofásicos passa por um controle do entreferro. O método de controle utilizado é um método atributivo que se utiliza de lâminas de folga, onde o operador circunda todo o perímetro da interface estator/rotor com essa lâmina, verificando assim se existe uma folga mínima em toda a região do entreferro. Porém, índices de qualidade internos e externos, apontam para uma baixa eficácia do método. Problemas de excentricidade do rotor são as principais causas de modos de falha relacionados ao entreferro. Como em grandes máquinas elétricas a excentricidade do rotor está relacionada principalmente com o desgaste de rolamentos e mancais do eixo ao longo da vida útil da máquina, isso motivou pesquisadores a desenvolverem métodos de detecção não invasivos da excentricidade do rotor para que pudessem ser utilizadas como técnicas de manutenção preditiva. A análise da assinatura da corrente do motor (*Motor Current Signature Analysis - MCSA*) é uma dessas técnicas, onde o sinal de corrente elétrica do estator é adquirido e processado de maneira a extrair informação sobre a condição de excentricidade do rotor. Este trabalho estuda os métodos *MCSA* assim como algumas técnicas de processamento de sinal que são utilizadas em conjunto. Na parte de avaliação, apenas os métodos que se utilizam da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*) são analisados experimentalmente, aplicando-se estes em dois motores de indução de pequeno porte. Os resultados obtidos atestam que tais métodos possibilitam a determinação da condição de excentricidade do rotor, permitindo a aplicação desses no controle de qualidade do entreferro.

**Palavras-chave:** compressores, motor de indução, excentricidade do rotor/entreferro, controle de qualidade, análise da assinatura da corrente do motor.



## ABSTRACT

Hermetic compressors used in refrigeration systems have in their interior electric motors as subsystem responsible for transmitting motion to the mechanical kit. The single-phase induction motor with squirrel cage rotor is the type of motor most commonly used in compressors intended for domestic and commercial light refrigeration. This type of engine has a number of characteristics that need to be controlled during the production process in order to ensure its quality. One of these characteristics is the radial gap between stator and rotor, known in the literature as air-gap. The air-gap characteristic is a critical characteristic of the induction motor, since it impacts both the performance and the reliability of the compressor. Due to this, 100% of the production of the single-phase motors goes through a control of the air-gap. The control method used is an attributive method that uses slack blades, where the operator surrounds the entire perimeter of the stator/rotor interface with this blade, verifying if there is a minimum gap in the entire region of the air-gap. However, internal and external quality indices point to a low efficacy of the method. Rotor eccentricity problems are the main causes of air-gap related failure modes. As in large electrical machines rotor eccentricity is primarily related to the wear of bearings and shaft bearings over the life of the machine, this motivated researchers to develop non-invasive rotor eccentricity detection methods so that they could be used as predictive maintenance techniques. Motor Current Signature Analysis (MCSA) is one such technique where the stator electrical current signal is acquired and processed in order to extract information about the rotor eccentricity condition. This work studies the MCSA methods as well as some signal processing techniques that are used together. In the evaluation part, only the methods that are used of the Fast Fourier Transform (FFT) are analyzed experimentally, applying these in two small induction motors. The results obtained confirm that these methods permit the determination of the rotor eccentricity condition, allowing the application of these in the air-gap quality control.

**Keywords:** compressor, induction motor, rotor/air-gap eccentricity, quality control, motor current signature analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Folga entre estator e rotor (entreferro) .....	32
Figura 1.2 - Procedimento de controle do entreferro com lâmina de folga .....	32
Figura 2.1 – Circuito básico de refrigeração .....	36
Figura 2.2 – Compressor hermético alternativo (principais componentes) .....	37
Figura 2.3 – Parte girante e estacionária do motor de indução .....	39
Figura 2.4 – Classificação dos motores elétricos .....	40
Figura 3.1 - Posições do centro geométrico do rotor, do estator e de rotação em diferentes excentricidades: (a) concêntrico, (b) excentricidade estática, (c) excentricidade dinâmica e (d) excentricidade mista .....	44
Figura 3.2 – Secção transversal de um motor com excentricidade .....	45
Figura 4.1 - Espectro ao redor da <i>PSH</i> de um motor sem falha/defeito .....	52
Figura 4.3 - Espectro ao redor da fundamental de um motor sem falha/defeito .....	54
Figura 4.4 – Espectro ao redor da fundamental de um motor com excentricidade elevada .....	54
Figura 4.5 – Diagrama de blocos de um esquema de monitoramento da corrente do estator .....	55
Figura 5.1 – Arranjo experimental empregado .....	62
Figura 5.2 – Osciloscópio Tektronix TBS 1072B-EDU .....	63
Figura 5.3 – Sonda de corrente LEM PR 30 .....	64
Figura 5.4 – Pannel de partida/alimentação .....	65
Figura 5.5 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	69
Figura 5.6 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 52,5\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	69
Figura 5.7 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	70
Figura 5.8 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 52,5\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	70





Figura 5.9 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	71
Figura 5.10 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 52,5\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	71
Figura 5.11 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	72
Figura 5.12 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 52,5\%$ e $DE = 7,2\%$ ) .....	72
Figura 5.13 – Gráfico de dispersão $PSD$ (dB) vs $SE$ (%) separado por amostra (COMPRESSOR A) .....	75
Figura 5.14 – Gráfico de dispersão $PSD$ (dB) vs $SE$ (%) separado por frequência (COMPRESSOR A) .....	75
Figura 5.15 – Gráfico de dispersão $PSD$ (dB) vs $SE$ (%) separado por amostra (COMPRESSOR B).....	78
Figura 5.16 – Gráfico de dispersão $PSD$ (dB) vs $SE$ (%) separado por frequência (COMPRESSOR B).....	78
Figura 5.17 – Gráfico de dispersão $PSD$ (dB) vs $DE$ (%) separado por frequência (COMPRESSOR A).....	79
Figura 5.18 – Gráfico de dispersão $PSD$ (dB) vs $DE$ (%) separado por frequência (COMPRESSOR B).....	80
Figura 5.19 – Frequências de excentricidade vs % de excentricidade .....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 – Ocorrência de Falhas em Motores - adaptado de [29] .....	47
Tabela 5-1 – Especificações e Parâmetros construtivos das amostras .....	66
Tabela 5-2 – Frequências de interesse de acordo com a equação (4.1).....	67
Tabela 5-3 – Frequências de interesse de acordo com a equação (4.2).....	68
Tabela 5-4 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais da frequência de alimentação (COMPRESSOR A) .....	73
Tabela 5-5 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais das frequências de ranhura (COMPRESSOR A) .....	74
Tabela 5-6 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais da frequência de alimentação (COMPRESSOR B).....	76
Tabela 5-7 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais das frequências de ranhura (COMPRESSOR B).....	77



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANN</i>	<i>Artificial Neural Network</i>
<i>CSCR</i>	<i>Capacitive Start – Capacitive Run</i>
<i>CSR</i>	<i>Capacitive Start &amp; Run</i>
<i>CSIR</i>	<i>Capacitive Start – Inductive Run</i>
<i>DE</i>	<i>Dynamic Eccentricity</i>
<i>DFT</i>	<i>Discrete Fourier Transform</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i>
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>FMM</i>	<i>Força Magnetomotriz</i>
<i>HST</i>	<i>High Starting Torque</i>
<i>LST</i>	<i>Low Starting Torque</i>
<i>MCSA</i>	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
<i>ME</i>	<i>Mixed Eccentricity</i>
<i>PSD</i>	<i>Power Spectral Density</i>
<i>PSH</i>	<i>Principal Slot Harmonic</i>
<i>PTC</i>	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
<i>PTCSCR</i>	<i>PTC Start – Capacitive Run</i>
<i>PTCSIR</i>	<i>PTC Start – Inductive Run</i>
<i>RSCR</i>	<i>Resistive Start – Capacitive Run</i>
<i>RSIR</i>	<i>Resistive Start – Inductive Run</i>
<i>SE</i>	<i>Static Eccentricity</i>
<i>SOM</i>	<i>Self-Organizing Map</i>
<i>STFT</i>	<i>Short-Time Fourier Transform</i>
<i>TSCFE-SS</i>	<i>Time-Stepping Coupled Finite-Element State-Space Method</i>
<i>TSD</i>	<i>Time Starting Device</i>
<i>UMP</i>	<i>Unbalanced Magnetic Pull</i>
<i>WFA</i>	<i>Winding Function Approach</i>
<i>WT</i>	<i>Wavelet Transform</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

$f_{ecc,HF}$	[Hz]	Frequências de excentricidade
$f_{ecc,LF}$	[Hz]	Frequências de excentricidade
$f_r$	[Hz]	Frequência de rotação do rotor
$f_s$	[Hz]	Frequência de alimentação
$g_0$	[mm]	Largura do entreferro uniforme
$g(t)$	[mm]	Largura mínima do entreferro
$j$		Representação de número imaginário
$k$		Índice
$n$		Tempo discreto
$n_d$		Índice
$O_r$		Centro geométrico do rotor
$O_s$		Centro geométrico do estator
$O_\omega$		Centro de rotação
$p$		Número de pares de polo
$R$		Número de ranhuras do rotor
$s$		Escorregamento por unidade
$S$		Escala
$t$	[s]	Tempo contínuo
$t_0$	[s]	Instante de tempo de interesse
$v$		Índice
$w(t - \tau)$		Função janela
$x(n)$		Sinal no domínio do tempo discreto
$x(t)$		Sinal no domínio do tempo contínuo
$X(t_0, s)$		Sinal no domínio tempo-frequência
$X(\omega)$		Sinal no domínio da frequência
$X(\Omega)$		Sinal no domínio da frequência
$X(\omega, \tau)$		Sinal no domínio da frequência

Alfabeto grego:

$\delta_d$		Excentricidade dinâmica relativa
$\delta_m(t)$		Excentricidade mista relativa
$\delta_s$		Excentricidade estática relativa
$\Delta$	[dB]	Diferença
$\theta(t)$	[rad]	Ângulo da posição do centro do rotor
$\tau$		Índice





$\varphi_m(t)$	[rad]	Ângulo da posição do entreferro mínimo
$\varphi_s$	[rad]	
$\psi_{t_0,s}(t)$		Função <i>wavelet</i>
$\Psi$		<i>Mother wavelet</i>
$\omega$	[rad/s]	Frequência
$\Omega$	[rad]	Frequência



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização .....</b>	<b>31</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>33</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	33
1.2.2	Objetivos específicos.....	33
<b>1.3</b>	<b>Delimitação do estudo .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>COMPRESSORES HERMÉTICOS E O MOTOR DE</b>	
	<b>INDUÇÃO MONOFÁSICO .....</b>	<b>35</b>
<b>2.1</b>	<b>Compressores herméticos .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2</b>	<b>O motor de indução monofásico.....</b>	<b>38</b>
2.2.1	Descrição e aspectos construtivos .....	38
2.2.2	Configurações de motor de indução monofásico utilizados em compressores herméticos alternativos .....	40
<b>3</b>	<b>EXCENRICIDADE DO ROTOR/ENTREFERRO.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Tipos, origens e efeitos da excentricidade do rotor .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelagem da excentricidade do rotor .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS DE ANÁLISE DAS CORRENTES DO</b>	
	<b>ESTATOR.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise da assinatura da corrente do motor (MCSA) ....</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>Técnicas de processamento de sinais .....</b>	<b>54</b>
4.2.1	<i>Fast Fourier Transform (FFT)</i> .....	55
4.2.2	<i>Short-Time Fourier Transform (STFT)</i> .....	56
4.2.3	<i>Wavelet Transform (WT)</i> .....	58
<b>5</b>	<b>AValiação EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DE</b>	
	<b>MCSA PARA DETECÇÃO DE EXCENRICIDADES.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>61</b>
5.1.1	Arranjo experimental empregado .....	62
5.1.2	Descrição das amostras .....	65
5.1.3	Implementação da excentricidade do rotor .....	66
5.1.4	Procedimento e frequências analisadas .....	67
<b>5.2</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>68</b>
5.2.1	Excentricidade estática ( <i>SE</i> ).....	68
5.2.2	Excentricidade dinâmica ( <i>DE</i> ) .....	79
<b>5.3</b>	<b>Análise de resultados.....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA</b>	
	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>83</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões finais .....</b>	<b>83</b>
6.1.1	Sobre as características e configurações do entreferro .....	83



6.1.2	Sobre os métodos de análise das correntes do estator .....	83
6.1.3	Sobre a avaliação desses métodos no controle de qualidade do entreferro .....	84
6.1.4	Sobre os resultados alcançados .....	84
<b>6.2</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE A : ESPECTRO DAS AMOSTRAS NAS FREQUÊNCIAS DE EXCENTRICIDADE.....</b>	<b>95</b>
	<b>APÊNDICE B : PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E TOPOLOGIAS DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS .....</b>	<b>133</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Em sistemas de refrigeração são utilizados normalmente compressores herméticos, nos quais uma carcaça de aço contém no seu interior o sistema motor-compressor e o gás de refrigeração. O motor é projetado para operar dentro dessa carcaça e ser resfriado pelo gás refrigerante que está sendo comprimido. Uma das vantagens desse equipamento é que, se apropriadamente selada a carcaça, não há risco de que o gás refrigerante vaze para o ambiente.

O motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo é o componente motriz de uma classe bastante significativa dos compressores herméticos [1], comumente com potência variando entre 30 W e 700 W [2] em sistemas de refrigeração doméstica e comercial.

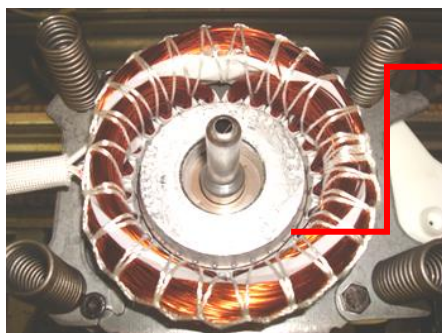
De todos os tipos de motores elétricos de corrente alternada, o motor assíncrono ou de indução é o mais popular e amplamente empregado [3]. Em função do número de unidades produzidas anualmente, o motor de indução monofásico assume a liderança, embora o motor de indução trifásico ocupe o primeiro lugar em termos de capacidade de potência e valor de mercado [4].

As recentes demandas impostas pelo mercado globalizado, de produtos com qualidade assegurada, têm exigido empenho adicional das indústrias em procedimentos que garantam essa condição, sem comprometer o tempo de produção [5]. A dificuldade em atender tais requisitos é muito maior em plantas com elevado fluxo de produção, caso da empresa parceira deste trabalho, líder mundial na fabricação de compressores herméticos.

Para manter sua forte colocação no mercado, a empresa fabricante de compressores e líder mundial do setor tem despendido muito esforço em controle de qualidade, o que inclui a avaliação de diversas características, de cada uma das unidades produzidas, ao longo das etapas do processo de produção. Entretanto, a velocidade do processo produtivo inviabiliza a aplicação de procedimentos mais elaborados, restringindo a análise a testes rápidos.

É o caso do controle do entreferro do motor de indução (Figura 1.1), que é realizado nas linhas de montagem, em 100% dos motores, através de um método atributivo simples e rápido que utiliza lâminas de folga (Figura 1.2). A lâmina de folga é utilizada de maneira a circundar todo o perímetro da região do entreferro, garantindo assim uma folga

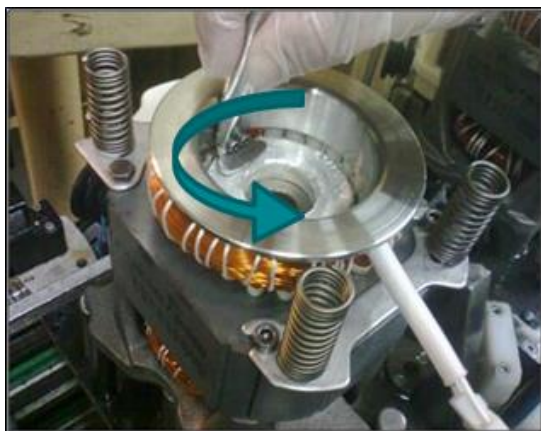
mínima em qualquer região do mesmo. Porém, indicadores de retornos de campo, de cliente e sucatas internas apontam para uma baixa eficácia deste método de controle, devido às tolerâncias dos componentes, da montagem e das características dinâmicas do entreferro.



Folga entre rotor / estator  
(entreferro)

Fonte: Autor

Figura 1.1 - Folga entre estator e rotor (entreferro)



Sentido do giro da  
lâmina de folga



Lâmina de folga

Fonte: Autor

Figura 1.2 - Procedimento de controle do entreferro com lâmina de folga



O contexto posto acima evidencia a necessidade de estabelecer mecanismos capazes de se adequarem aos procedimentos empregados atualmente, permitindo controle de qualidade mais efetivo de cada uma das unidades produzidas. Assim, propõe-se estudar e avaliar a aplicabilidade de métodos de análise das correntes do estator para o monitoramento do entreferro nas linhas de produção.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é sistematizar informações sobre métodos de medição do entreferro através da análise das correntes do estator e analisar a aplicabilidade de tais métodos no controle da qualidade de motores de indução monofásicos associados a compressores herméticos de refrigeração.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- estudar as características e as configurações de entreferro;
- estudar os métodos de análise das correntes do estator (*Motor Current Signature Analysis - MCSA*);
- avaliar se esses métodos apresentam potencial para aplicação no controle de qualidade do entreferro nas linhas de montagem.

## 1.3 Delimitação do estudo

O presente trabalho estudará as características do entreferro de motores de indução utilizados em compressores herméticos principalmente no que tange à parte relacionada a problemas de excentricidade do rotor/entreferro, oriundos dos processos de fabricação e montagem, incluindo suas respostas frente aos principais métodos de análise das correntes do estator (*MCSA*).

Quanto à avaliação experimental, o enfoque será o de validar a *MCSA* analisando sua viabilidade técnica frente às variações típicas de fabricação do entreferro para alguns modelos de compressores típicos. Definir com alto grau de exatidão as curvas resposta para os diversos modelos não está no escopo deste trabalho.

## 1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos.

No capítulo 1 é apresentado o tema, o objetivo geral, os objetivos específicos, as justificativas, a delimitação do estudo e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 traz informações gerais acerca do produto compressor hermético e das configurações de motores de indução monofásicos presentes nesses produtos.

No capítulo 3 é apresentado o problema excentricidade do rotor/entreferro. Aqui veremos resumidamente os tipos, as origens e os efeitos da excentricidade. É apresentada também uma modelagem simples desse modo de falha.

No capítulo 4 expõe-se sobre o método *MCSA* fazendo-se uma revisão bibliográfica das principais publicações e assuntos já estudados até o momento. Mostram-se também os principais métodos desenvolvidos assim como se discorre sobre as técnicas de processamento de sinais normalmente aplicadas.

O capítulo 5 possui a metodologia empregada e todas as análises realizadas, assim como os resultados obtidos a partir destas análises.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais, conclusões e oportunidades de trabalhos futuros, apresentando, na sequência, as referências bibliográficas citadas e estudadas para o desenvolvimento desta dissertação.

## **2 COMPRESSORES HERMÉTICOS E O MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO**

### **2.1 Compressores herméticos**

O emprego dos meios de refrigeração já era do conhecimento humano mesmo na época das mais antigas civilizações. Assim, podemos citar os chineses que, muitos séculos antes do nascimento de Cristo, usavam o gelo natural, colhido nas superfícies dos rios e lagos congelado, com a finalidade de conservar o chá que consumiam, conservando-o, com grandes cuidados, em poços cobertos com palha e cavados na terra. Os primitivos gregos e romanos também aproveitavam o gelo colhido no alto das montanhas, a custo do braço escravo, para o preparo de bebidas e alimentos gelados. Já os egípcios, que devido à situação geográfica e ao clima de seu país não dispunham de gelo natural, refrescavam a água por evaporação usando vasos de barro, semelhantes a moringas, tão comuns no interior do Brasil. O barro, sendo poroso, deixa passar um pouco de água contido no seu interior e, a evaporação desta pelo vento, faz baixar a temperatura [6].

Se analisarmos como obtemos a refrigeração através dos refrigeradores atuais, constataremos que o princípio é o mesmo. No caso do refrigerador, o calor necessário, para evaporar o refrigerante na forma líquida, é retirado do ar e dos produtos que são colocados no interior do mesmo, obtendo assim o efeito da refrigeração. Isto acontece porque o refrigerante usado, por exemplo, R134a, tem a propriedade de se evaporar em temperatura bem mais baixa que a água, sendo igual a  $-27^{\circ}\text{C}$  na pressão atmosférica. Também como no caso da água, a temperatura na qual o R134a evapora dependerá da pressão no evaporador, a qual é definida quando do projeto do sistema de refrigeração.

A descoberta de que a refrigeração poderia impedir a multiplicação dos micro-organismos causadores da deterioração dos alimentos, podendo ser utilizada na conservação dos alimentos frescos, provocou, no século XVIII, uma grande expansão da indústria do gelo. Contudo, devido às dificuldades na obtenção, transporte e conservação do gelo natural, engenheiros e pesquisadores se voltaram para a busca de meios e processos que permitissem a obtenção artificial do gelo, liberando o homem da dependência da natureza. Em consequência desses estudos, foi inventado nos Estados Unidos, em 1834, o primeiro sistema mecânico de fabricação de gelo artificial, que constitui a base precursora dos atuais sistemas de compressão frigorífica [6].

Os quatro componentes principais de um sistema de refrigeração à compressão são: o compressor, o condensador, o elemento de controle e o evaporador (Figura 2.1). O compressor representa o principal elemento do sistema de refrigeração e o seu desempenho depende de muitos aspectos construtivos.

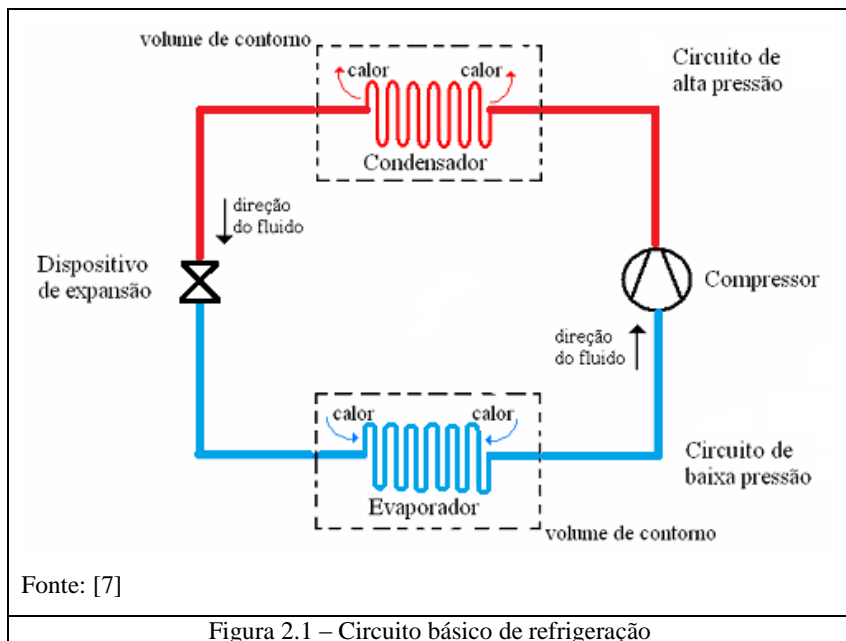


Figura 2.1 – Circuito básico de refrigeração

O compressor é responsável por forçar a circulação do fluido no sistema de refrigeração e pode ser apresentado em diferentes configurações. Em relação aos aspectos construtivos, os compressores podem ser divididos em recíprocos alternativos, rotativos, scroll, parafuso e centrífugos. Os alternativos podem ser novamente classificados em abertos, semi-herméticos e herméticos [8], [9].

Os primeiros compressores alternativos para refrigeração foram desenvolvidos em meados de 1860. Desde lá, o mecanismo de compressão praticamente não sofreu alteração, havendo apenas melhorias construtivas e emprego de novos materiais [10].

Os compressores são constituídos de 3 (três) subsistemas principais, sendo eles: o cabeçote, o kit mecânico e o motor elétrico. A Figura 2.2 apresenta uma vista explodida mostrando os principais componentes de um compressor hermético alternativo.



Fonte: [11]

Figura 2.2 – Compressor hermético alternativo (principais componentes)

O subsistema motor elétrico é o subsistema de interesse desta dissertação e será apresentado detalhadamente na seção a seguir.

## 2.2 O motor de indução monofásico

### 2.2.1 Descrição e aspectos construtivos

Máquinas elétricas são extensivamente utilizadas, sendo o núcleo da maioria dos sistemas de engenharia. Essas máquinas vêm sendo aplicadas em todos os tipos de indústrias. Uma máquina de indução é definida como uma máquina assíncrona que compreende um circuito magnético que interliga dois circuitos elétricos, que estão em rotação um em relação ao outro, em que a energia é transferida de um circuito para o outro pela indução eletromagnética. O motor é um dispositivo de conversão eletromecânica de energia que converte a energia na forma elétrica para a forma mecânica [12]. A conversão de energia depende da existência na natureza do fenômeno de inter-relação dos campos elétrico e magnético de um lado, e da força mecânica e movimento do outro.

Os motores de indução monofásicos são usualmente empregados em aplicações de baixa potência (inferior a 2,2 kW) e que admitem rotação constante, em locais onde se tem disponível rede elétrica monofásica, como em áreas residenciais, rurais e algumas instalações industriais [1], [2].

As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são 127 V e 220 V [13], de tal modo que os motores monofásicos podem ser ligados a duas fases (tensão de linha) ou a uma fase e o neutro (tensão de fase), tomando cuidado que a tensão aplicada ao motor monofásico corresponda com sua tensão nominal – igual a uma dessas duas tensões do sistema [1]. No mundo, a tensão elétrica monofásica varia de 100 V a 240 V de acordo com as normas vigentes em cada país. Compressores herméticos são comumente fabricados para operarem em tensões de corrente alternada de 115 V, 127 V, 220 V e 240 V [14].

O enrolamento do rotor pode ser do tipo gaiola de esquilo ou do tipo bobinado [15], sendo o rotor do tipo gaiola de esquilo o utilizado em compressores herméticos para refrigeração.

O rotor do tipo gaiola de esquilo é formado pelas barras condutoras, dispostas em forma de gaiola cilíndrica, e o núcleo magnético, formado pelas chapas de aço (Figura 2.3 a). É a parte girante da máquina, acoplada ao eixo, o qual é suportado pelos mancais ou rolamentos [16].

A parte estacionária ou estator é constituída da carcaça ou suporte; do estator (Figura 2.3 b), formado pelo núcleo ou pacote de chapas de aço laminadas e enrolamentos – que sobressaem do núcleo formando a cabeça de bobina –; e de elementos elétricos de conexão e controle de partida [16], [17]. O enrolamento é o conjunto de bobinas que percorri-

do por corrente elétrica cria um campo magnético, segundo a norma ABNT NBR 5457 [18].

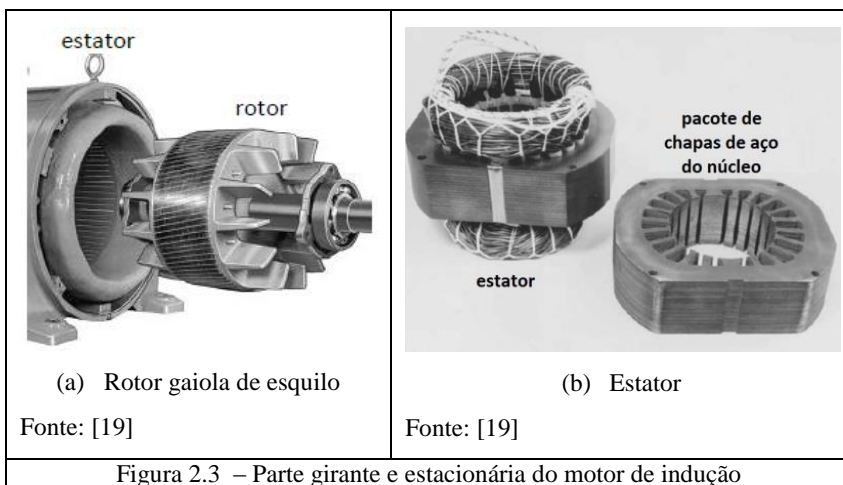


Figura 2.3 – Parte girante e estacionária do motor de indução

Por fim, o espaço definido entre o estator e o rotor é denominado entreferro, com um comprimento físico muito menor do que o raio do rotor.

A aplicação de tensão nos terminais do enrolamento do estator faz com que apareça uma tensão nos enrolamentos do rotor. Dessa forma, o estator pode ser considerado como o primário de um transformador e o rotor como seu secundário [1].

Diante do universo das máquinas elétricas (Figura 2.4), o motor de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo é o que tem uso mais difundido, devido, principalmente, as vantagens de inerente simplicidade de construção e controle, seu baixo custo e, obviamente, sua adaptabilidade aos ambientes mais agressivos [1].

Na grande maioria das residências e em algumas instalações industriais, o atendimento de energia elétrica é feito pela concessionária distribuidora no esquema de duas fases ou em fase-neutro, demandando o uso de motores monofásicos. Eletrodomésticos como ventiladores, condicionadores de ar, refrigeradores e *freezers* são os grandes responsáveis pela difusão das máquinas monofásicas de indução.

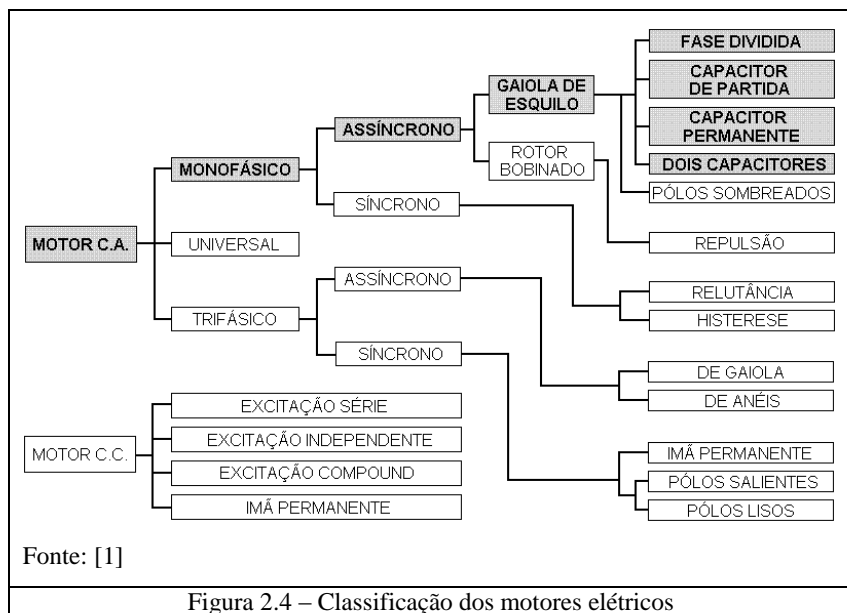


Figura 2.4 – Classificação dos motores elétricos

### 2.2.2 Configurações de motor de indução monofásico utilizados em compressores herméticos alternativos

Os motores utilizados nos compressores da empresa líder mundial do setor são divididos em duas categorias em relação ao torque de partida:

- **LST (Low Starting Torque)**: baixo torque de partida. Empregado em sistemas de refrigeração que utilizam tubo capilar (partida com pressões de sucção e descarga equalizadas);
- **HST (High Starting Torque)**: alto torque de partida. Empregado em sistemas de refrigeração que utilizam válvula de expansão, ou mesmo tubo capilar quando o intervalo entre uma partida e outra é muito curto (partida com pressões de sucção e descarga desequalizadas).

Com relação à topologia, os motores de indução empregados nos compressores da empresa são:

- **RSIR (Resistive Start – Inductive Run) ou PTCSIR (PTC Start – Inductive Run)**: são os motores de fase dividida, utilizando um relé ou dispositivo do tipo PTC para desconectar o enrolamento auxiliar após a partida;



- **CSIR (Capacitive Start – Inductive Run)**: são os motores de fase dividida com capacitor de partida;
- **RSCR (Resistive Start – Capacitive Run) ou PTCSCR (PTC Start – Capacitive Run)**: são uma combinação dos motores de fase dividida com os motores de fase dividida com capacitor permanente. Partem como um motor de fase dividida e conectam o capacitor após a partida;
- **CSR (Capacitive Start & Run) ou CSCR (Capacitive Start – Capacitive Run)**: são os motores de fase dividida com dois capacitores.

Maiores informações a respeito do princípio de funcionamento, topologias e partida de motores de indução monofásicos se encontram disponíveis no APÊNDICE B.



### 3 EXCENTRICIDADE DO ROTOR/ENTREFERRO

#### 3.1 Tipos, origens e efeitos da excentricidade do rotor

Traduzindo-se na introdução de assimetrias no circuito magnético (entreferro não uniforme), a excentricidade do rotor constitui um problema particularmente significativo no domínio dos motores de indução, principalmente nos motores de indução monofásicos de baixa potência em virtude da reduzida largura do entreferro [23].

As variações na largura do entreferro resultam em uma distribuição assimétrica de fluxo magnético nessa região que, por sua vez, desencadeia uma série de efeitos indesejáveis: desequilíbrio das forças radiais no entreferro (*Unbalanced Magnetic Pull - UMP*), passagem da corrente elétrica induzida através do eixo e mancais, vibrações e ruído [24].

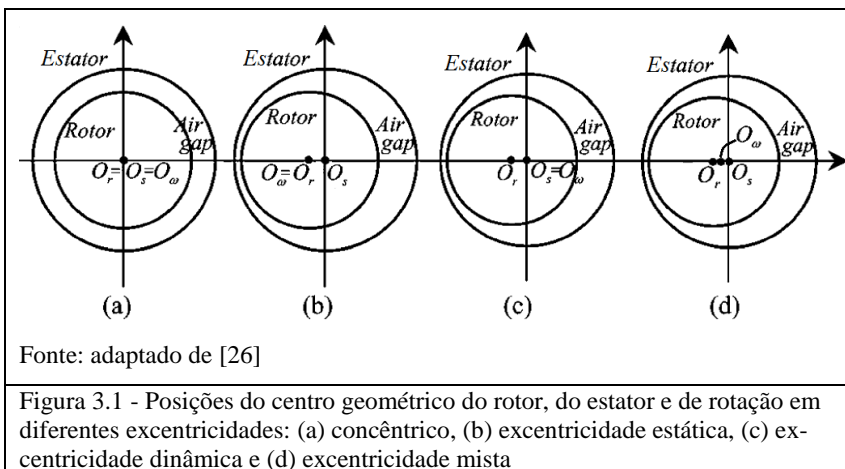
O *UMP* é o efeito que pode trazer consequências mais severas como, por exemplo, o contato entre rotor e estator na condição mais extrema. Outro ponto importante é que o *UMP* será tanto mais elevado quanto maior for o valor das correntes nas barras rotóricas, o que significa que a situação mais crítica ocorrerá durante o arranque/aceleração do motor, exigindo desse um maior torque de partida em relação à situação de entreferro uniforme [25].

Existem basicamente quatro tipos de excentricidade do rotor:

- **Excentricidade nula/concêntrico (Figura 3.1 a):** caracteriza-se pelo centro geométrico do rotor ( $O_r$ ), centro geométrico do diâmetro interno do estator ( $O_s$ ) e do centro geométrico de rotação ( $O_w$ ) serem coincidentes, ou seja, estarem localizados na mesma posição. A largura radial do entreferro apresenta-se homogeneia ao longo de todo o perímetro do rotor – desconsideram-se aqui os erros de forma do estator e do rotor. Esse é o caso virtual de uma fabricação/montagem perfeita.
- **Excentricidade estática (*SE – Static Eccentricity*) (Figura 3.1 b):** caracteriza-se pelo centro do rotor ( $O_r$ ) encontrar-se coincidente com o centro de rotação ( $O_w$ ), porém deslocado do centro do estator ( $O_s$ ). A posição da largura mínima radial do entreferro apresenta-se fixa no espaço. Esta é causada geralmente pelo incorreto posicionamento do rotor ou do estator durante o processo de montagem.
- **Excentricidade dinâmica (*DE – Dynamic Eccentricity*) (Figura 3.1 c):** caracteriza-se pelo centro do rotor ( $O_r$ ) estar

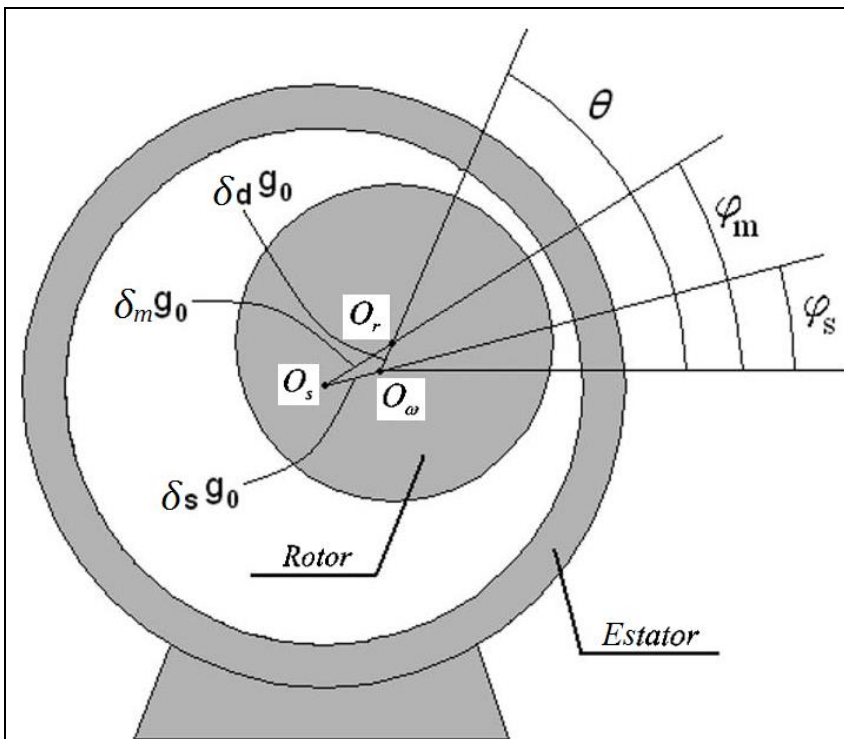
deslocado do centro de rotação ( $O_w$ ) e do centro do estator ( $O_s$ ), estando os dois últimos coincidentes. A largura mínima radial do entreferro apresenta-se de maneira a variar no espaço e no tempo, ou seja, de maneira a circundar o perímetro interno do estator. Esta é causada geralmente pela não concentricidade do diâmetro externo do rotor em relação ao diâmetro interno.

- **Excentricidade mista (ME – Mixed Eccentricity) (Figura 3.1 d):** caracteriza-se por um total desencontro do centro do rotor ( $O_r$ ), do estator ( $O_s$ ) e de rotação ( $O_w$ ), sendo a combinação da excentricidade estática com a dinâmica. É o caso de um motor de indução real, onde temos sempre presente certo grau de excentricidade estática e certo grau de excentricidade dinâmica, devido às tolerâncias de fabricação dos componentes e procedimentos de montagem.



### 3.2 Modelagem da excentricidade do rotor

Com base no esquema abaixo (Figura 3.2), se pode determinar a largura mínima do entreferro e sua posição no perímetro do diâmetro interno do estator [26], [27]:



Fonte: adaptado de [27]

Figura 3.2 – Seção transversal de um motor com excentricidade

$$g(t) = g_0[1 - \delta_m(t)], \quad (3.1)$$

$$\varphi_m(t) = \varphi_s + \tan^{-1} \left\{ \frac{\delta_d \sin[\theta(t) - \varphi_s]}{\delta_s + \delta_d \cos[\theta(t) - \varphi_s]} \right\}, \quad (3.2)$$

$$\delta_m(t) = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_d^2 + 2\delta_s\delta_d \cos[\theta(t) - \varphi_s]}, \quad (3.3)$$

$$\delta_s = \frac{|O_s O_\omega|}{g_0}, \quad (3.4)$$

$$\delta_d = \frac{|O_\omega O_r|}{g_0}, \quad (3.5)$$

onde:

- $g(t)$  = largura mínima do entreferro [mm];
- $g_0$  = largura do entreferro uniforme [mm];
- $\delta_m(t)$  = excentricidade mista relativa;
- $\varphi_m(t)$  = ângulo da posição do entreferro mínimo [rad];
- $\varphi_s$  = ângulo que o centro ( $O_\omega$ ) está separado do centro ( $O_s$ ) [rad];
- $\delta_s$  = excentricidade estática relativa;
- $\delta_d$  = excentricidade dinâmica relativa;
- $\theta(t)$  = ângulo da posição do centro do rotor ( $O_r$ ) [rad];
- $t$  = tempo [s];
- $|O_s O_\omega|$  = módulo vetor transferência da  $SE$  [mm];
- $|O_\omega O_r|$  = módulo vetor transferência da  $DE$  [mm].

Além dos erros de posição na direção radial (erros de concentricidade), temos como causadores de entreferro não uniforme os erros de forma do estator e do rotor, os erros de batimento do rotor, desgaste dos rolamentos, a deformação de eixos, o desequilíbrio dinâmico do rotor, a ressonância mecânica à velocidade crítica, deformações resultantes de gradientes térmicos e os erros de paralelismo entre rotor e estator, este último gerando um entreferro não uniforme também na direção axial.

## 4 MÉTODOS DE ANÁLISE DAS CORRENTES DO ESTATOR

### 4.1 Análise da assinatura da corrente do motor (MCSA)

Máquinas elétricas estão frequentemente expostas a ambientes de operação não ideais ou até mesmo agressivos. Essas circunstâncias incluem sobrecarga, lubrificação insuficiente, frequentes solicitações de partida do motor, refrigeração inadequada, etc. Sob essas condições, motores elétricos estão sujeitos a indesejados estresses que colocam os motores em condições de risco de faltas ou falhas [28]. De acordo com o padrão IEEE 493:1997 [29], as falhas mais comuns em motores elétricos, e suas estatísticas de ocorrência, estão listadas na Tabela 4-1. Falhas em rolamentos e no eixo normalmente geram problemas no entreferro.

Tabela 4-1 – Ocorrência de Falhas em Motores - adaptado de [29]

Local da Falha	Número de Falhas				
	Motor de Indução	Motor Síncrono	Motor com Rotor Bobinado	Motor DC	%
Rolamento	152	2	10	2	44
Bobina	75	16	6	--	26
Rotor	8	1	4	-	3
Eixo	19	-	--	-	5
Escovas ou Anéis	--	6	8	2	4
Componentes Externos	40	7	1	-	13
Outros	10	9	--	2	6

Motores de indução são componentes críticos de muitos processos industriais devido a sua robustez e confiabilidade. Diagnósticos online de falhas nestas máquinas são muito importantes para garantir uma operação segura, mitigar grandes custos de manutenção e evitar prejuízos por lucro cessante. Devido a isso, técnicas de monitoramento da condição de operação do motor de indução têm sido vastamente investigadas nas últimas décadas. Monitoramento da condição de operação é definido como a avaliação contínua da saúde do motor durante todo o seu ciclo de vida [30].

Existem diversos métodos de monitoramento da condição de operação de máquinas elétricas, sendo os mais comuns o monitoramento de vibrações, de temperatura, de fluxo magnético, de torque e de posição do rotor [31]. De fato, grandes máquinas elétricas muitas vezes são equipadas com sensores mecânicos, indutivos, térmicos e capacitivos. No entanto, esses sensores são delicados, caros e de difícil instalação ou incorporação na estrutura da máquina, sendo esses alguns dos motivos da utilização estar bastante concentrada em grandes máquinas. Assim, a substituição destes sensores caros por outros mais baratos e mais confiáveis seria muito vantajoso.

Monitoramento da condição de operação de motores via grandezas elétricas é o método de monitoramento da condição mais recentemente desenvolvido e ainda não comercializado. No entanto, está sob investigação por muitos pesquisadores por causa de seus importantes benefícios. Medição de grandezas elétricas utilizando-se de sensores mais baratos é de longe muito mais viável do que medição de grandezas mecânicas. Outra vantagem desses métodos é a possibilidade do monitoramento tanto de parâmetros elétricos como de parâmetros mecânicos em uma única unidade [32], [33], [34].

A análise da assinatura da corrente do motor (*MCSA*) é uma técnica usada para determinar a condição de operação de um motor de indução durante seu funcionamento através do monitoramento de grandezas elétricas. *MCSA* detecta as falhas em seus estágios iniciais e evita danos assim como a completa falha do motor [35]. *MCSA* é baseada no monitoramento da corrente do motor de indução, portanto é menos custosa em relação a outras técnicas que se utilizam de sensores e demais aparatos especiais. *MCSA* utiliza-se do espectro da corrente da máquina para localizar frequências decorrentes de falhas/defeitos. Quando uma falha está presente, o espectro de frequência da corrente torna-se diferente de um motor isento de defeitos (Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4). Métodos baseados na *MCSA* são utilizados para diagnosticar falhas comuns de motores de indução como, por exemplo, barramentos interrompidos/quebrados, curto-circuito entre espiras, excentricidade do rotor/entreferro, falhas em rolamentos etc [31], [35]. Conforme a Tabela 4-1, aproximadamente 40-50% das falhas em motores de indução são devido a falhas mecânicas. Como a maioria de falhas mecânicas eventualmente levam a problemas de excentricidade do rotor/entreferro, consequências destrutivas poderiam ser evitadas através da detecção incipiente da condição de excentricidade [36], [37], [38], [39].

A excentricidade do rotor/entreferro produz padrões espectrais únicos que podem ser identificados no espectro da corrente. A análise



baseia-se na abordagem de onda rotativa em que as ondas de fluxo magnético no entreferro são tomadas como produto da permeância e da FMM [40]. Isto significa que o campo no entreferro é complexo e compreende as seguintes componentes:

- fundamental;
- harmônicas da FMM do estator e do rotor;
- harmônicas da permeância do estator e das ranhuras do rotor;
- harmônicas da permeância da excentricidade do rotor/entreferro;
- harmônicas de permeância devido à saturação.

Harmônicas de excentricidade vêm sendo estudadas por diversos autores ao redor do mundo, principalmente nos últimos anos. Um dos primeiros trabalhos pode ser verificado em Cameron, Thomson e Dow [41] que fizeram um estudo para detectar a excentricidade do rotor em um motor de indução de grande porte (Trifásico – 11 kV – 1,2 MW) analisando o espectro da corrente de linha. Nesse estudo, puderam verificar que as amplitudes de algumas componentes espectrais variam de acordo com o grau de excentricidade do rotor. Thomson, Rankin e Dorrel [42], [43] verificaram que o uso do espectro da corrente era um sucesso no diagnóstico de problemas de excentricidade do rotor em motores de indução trifásicos de grande porte e alta tensão de alimentação.

Benbouzid [44], [45] investigou a eficácia da análise espectral da corrente para a detecção de falhas em motores de indução trifásicos de médio porte. As assinaturas em frequência de algumas falhas que geram assimetrias no motor, incluindo excentricidade do rotor, barras quebradas, oscilação da velocidade de rotação, assimetrias no rotor e falhas de rolamentos, foram identificadas. Seu trabalho verificou a viabilidade da análise espectral da corrente para esse fim.

Além de motores de indução, a análise espectral da corrente foi aplicada também em outras máquinas elétricas. Por exemplo, Le Roux, Harley e Habetler [46] monitoraram componentes harmônicas da corrente na frequência de alimentação (ex: harmônica de ordem 0,5) para detectar falhas do rotor de uma máquina síncrona de ímãs permanentes.

Schoen e Habetler [47] investigaram os efeitos da oscilação da carga na detecção da excentricidade do rotor. As variações de torque encontradas causaram as mesmas harmônicas que a excentricidade. Essas harmônicas são sempre mais pronunciadas que as harmônicas relacionadas à excentricidade do rotor. Portanto, é impossível separar oscilações de torque e excentricidade a menos que a posição angular da

falha de excentricidade em relação à característica de torque de carga seja conhecida.

Na análise espectral da corrente, os harmônicos medidos a partir de uma máquina em funcionamento são sempre comparados com valores conhecidos (limiares) obtidos a partir de um motor saudável. Em aplicações práticas, os limiares mudam com as condições de operação do motor. Em função disso, Obaid e Habetler [48] propuseram mapear os valores normais de um motor saudável em diferentes condições de carga. Para cada condição de carga, foi determinado um limiar correspondente e comparado com a medição em linha para determinar a condição do motor.

Além da tradicional técnica *Fast Fourier Transform (FFT)* de análise espectral, outras técnicas de processamento avançado de sinais digitais e reconhecimento de padrões foram aplicadas também ao monitoramento da condição de motores. Yazici e Kliman [49] monitoraram a corrente do estator e aplicaram a *Short-Time Fourier Transform (STFT)* para detectar barras quebradas e falhas de rolamentos em motores de indução. Seus resultados experimentais apoiaram as vantagens da *STFT* em relação à tradicional *FFT* devido à corrente do estator não ser estacionária em aplicações práticas. Kliman e Song [50] usaram a *Wavelet Transform (WT)* da corrente do estator para monitorar remotamente as faíscas das escovas de um motor DC. No entanto, é difícil determinar funções *Wavelet* adequadas se as condições de funcionamento do motor mudarem com frequência, como em um acionamento por controle vetorial. Haji e Toliyat [51] usaram um classificador Bayes de erro mínimo para detectar excentricidade e barras quebradas em motores de indução. Eles assumiram que a assinatura de falha tinha uma função de densidade de distribuição normal. No entanto, os parâmetros de distribuição tinham de ser determinados empiricamente.

Ao contrário da medida direta, na estimativa de parâmetros baseada em modelos, os limiares de um motor saudável podem ser calculados por simulação. Toliyat, Lipo e White [52] usaram a abordagem *Winding Function Approach (WFA)* para simular um motor de indução. A ideia básica é substituir o rotor da gaiola de esquilo por  $n$  loops independentes, onde  $n$  é o número de barras do rotor. Então, as indutâncias dos  $n$  loops do rotor e das  $m$  fases do estator podem ser calculadas a partir da FMM, da permeância e do entreferro. Uma vez que as indutâncias são conhecidas, a corrente do motor e o torque podem ser calculados. O *WFA* foi aplicado para detectar falhas de excentricidade do entreferro em motores de indução [53], [54], [55] e em uma máquina síncrona [56]. Nandi, Ahmed e Toliyat [53] simularam um motor de indução

trifásico usando o *WFA* e descobriram que a ranhura do rotor e outros harmônicos da corrente do estator relacionados à excentricidade dependiam da estrutura da gaiola do rotor. A análise de elementos finitos é outro método popular para simular máquinas elétricas. Thomson e Barbour [57], [58] usaram o Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) para prever o nível de excentricidade estática em motores de indução trifásicos. Sua investigação mostrou que essas previsões estavam muito mais próximas dos valores medidos em comparação com tentativas anteriores usando o clássico FMM e a abordagem de ondas de permeância. Demerdash e Bangura [59] calcularam os harmônicos de corrente relacionados à excentricidade de um motor de indução de gaiola de esquilo usando o Método de Espaços de Estado acoplado ao Método de Elementos Finitos Passo a Passo no Tempo (*Time-Stepping Coupled Finite Element State-Space Method - TSCFE-SS*). Em sua pesquisa, os autores calcularam o campo magnético de um motor de indução por *FEM* em cada etapa de rotação. Para todas as estimativas de parâmetros baseadas em modelos, a confiabilidade diagnóstica depende fortemente da precisão do modelo. No entanto, na maioria das aplicações, informações precisas sobre parâmetros para máquinas elétricas ou unidades não estão disponíveis, limitando a implementação de estimativas de parâmetros em aplicações práticas.

Pensando na automação de detecção, muitos métodos diferentes baseados em Rede Neural Artificial (*Artificial Neural Network - ANN*) foram desenvolvidos e implementados. Goode e Chow [60], [61] propuseram a utilização de um sistema fuzzy ou neural/fuzzy para detectar problemas de isolamento do motor. Tal sistema ajuda a dar razões exatas para um fenômeno anormal, mas é difícil estabelecer regras fuzzy adequadas. Bernieri, Betta e Liguori [62], Murray e Penman [63] utilizaram um *Self-Organizing Map (SOM)* para detectar falhas ao distinguir um padrão de falha de um padrão normal adquirido. Porém é difícil encontrar uma regra de indução eficaz, isto é, embora um padrão de desvio apareça, é difícil decidir se é devido à falha esperada.

Dois métodos têm sido propostos para a detecção de excentricidades. O primeiro monitora o comportamento da corrente nas bandas laterais das frequências de ranhura (*Principal Slot Harmonic - PSH*) [41] (Figura 4.1, Figura 4.2):

$$f_{ecc,HF} = f_s \left[ (kR \pm n_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm v \right], \quad (4.1)$$

Onde:

$f_{ecc,HF}$  = frequências associadas com a excentricidade;

$f_s$  = frequência de alimentação;

$k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;

$R$  = número de ranhuras do rotor;

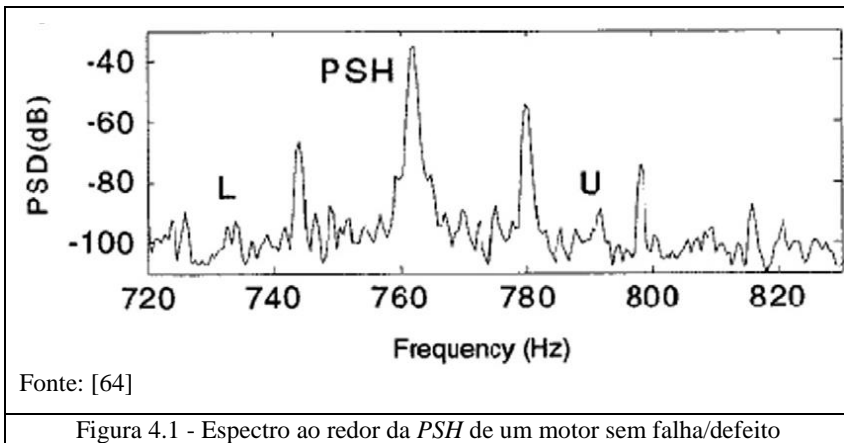
$n_d = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;

$s$  = escorregamento por unidade;

$p$  = número de pares de pólo;

$\nu = 1, 3, 5, \dots$

Em geral essa equação pode ser usada para prever o conteúdo espectral do sinal de corrente. Há três índices na equação e, portanto, três conjuntos de harmônicas:  $k$  está relacionado ao rotor,  $\nu$  está relacionado ao estator e  $n_d$  relacionado à excentricidade. Para excentricidade estática  $n_d = 0$  e para excentricidade dinâmica  $n_d = 1, 2, 3, \dots$



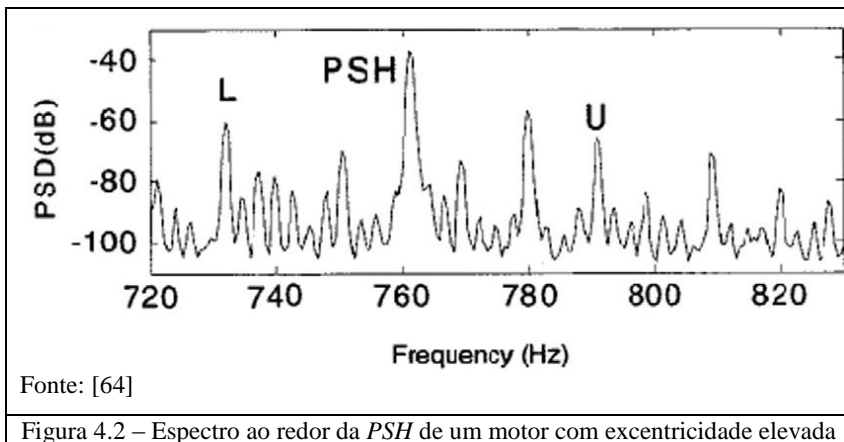


Figura 4.2 – Espectro ao redor da *PSH* de um motor com excentricidade elevada

Enquanto este esquema tem a vantagem de separar os componentes espectrais produzidos pela excentricidade daqueles causados por barramentos interrompidos, que é outro tipo de defeito de motores de indução, este tem a desvantagem de requerer um íntimo conhecimento dos aspectos construtivos da máquina, como o número de ranhuras do rotor [31].

O segundo método monitora o comportamento da corrente nas bandas laterais da frequência de alimentação [65] (Figura 4.3, Figura 4.4):

$$f_{ecc,LF} = f_s \left[ 1 \pm k \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] = f_s \pm k f_r, \quad (4.2)$$

Onde:

$f_{ecc,LF}$  = frequências associadas com a excentricidade;

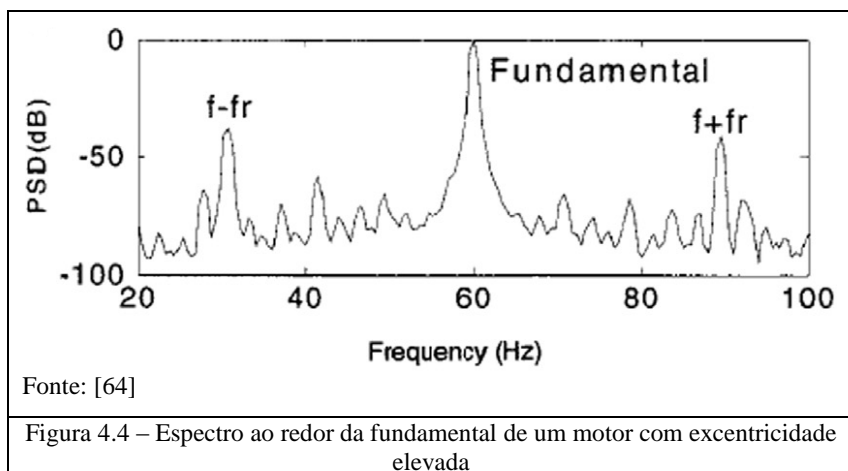
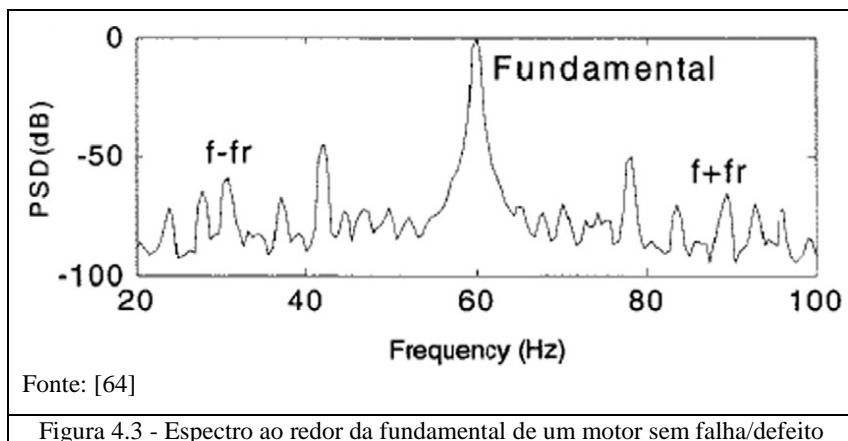
$f_s$  = frequência de alimentação;

$k = 1, 2, 3, \dots$ ;

$s$  = escorregamento por unidade;

$p$  = número de pares de pólo;

$f_r$  = frequência de rotação do rotor.



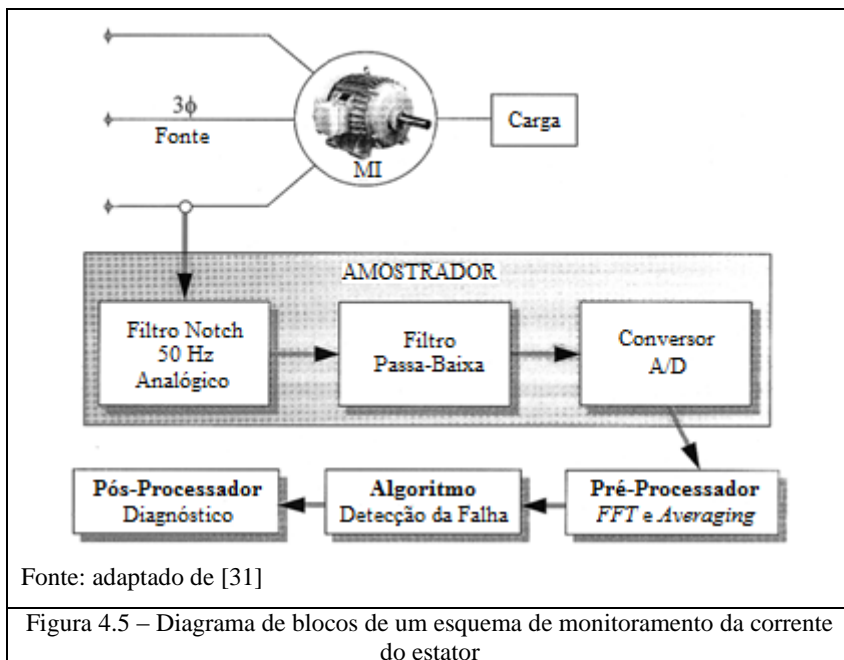
Este esquema fornece a vantagem de não requerer qualquer conhecimento dos aspectos construtivos da máquina.

## 4.2 Técnicas de processamento de sinais

As técnicas de monitoramento da corrente consistem de alguns estágios. A (Figura 4.5) mostra um diagrama de blocos contendo esses estágios.

A etapa chamada de Pré-processador, é a etapa na qual o sinal adquirido é manipulado com o objetivo de se extrair as informações

necessárias para verificar a presença de faltas no motor. Existem diversas técnicas de processamento de sinal para serem utilizadas na detecção das falhas/defeitos, em especial o grau de excentricidade do rotor/entreferro, sendo as mais utilizadas a *FFT*, a *STFT* e a *WT*.



#### 4.2.1 Fast Fourier Transform (FFT)

A transformada de Fourier é uma operação matemática que transporta um sinal do domínio do tempo para o da frequência e vice-versa, partindo do pressuposto de que todo sinal pode ser definido como a soma ponderada de funções trigonométricas. A equação (4.3) representa essa ferramenta matemática no domínio do tempo contínuo [66]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt, \quad (4.3)$$

Onde:

$X(\omega)$  = sinal no domínio da frequência;  
 $x(t)$  = sinal no domínio do tempo;  
 $j$  = representação de número imaginário;  
 $\omega$  = frequência [rad/s];

$t$  = tempo.

No domínio do tempo discreto, tal operação é intitulada Transformada Discreta de Fourier (*DFT - Discrete Fourier Transform*) e é apresentada na equação (4.4). Nesse domínio, o sinal é amostrado a determinada frequência de amostragem, obtendo-se  $x(n)$  [66]:

$$X(\Omega) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n)e^{-j\Omega n}, \quad (4.4)$$

Onde:

$X(\Omega)$  = sinal no domínio da frequência;  
 $x(n)$  = sinal no domínio do tempo;  
 $j$  = representação de número imaginário;  
 $\Omega$  = frequência [rad];  
 $n$  = tempo discreto.

Apesar da Transformada Discreta de Fourier (*DFT*) ser o mais direto procedimento matemático para determinar o conteúdo espectral de uma sequência no domínio do tempo, este é ineficiente. Em 1965 um artigo foi publicado por Cooley e Tukey descrevendo um algoritmo muito eficiente para implementar a *DFT*. Este algoritmo modificado é conhecido como *Fast Fourier Transform (FFT)*. *FFT* é simplesmente uma maneira computacionalmente eficiente de calcular a *DFT*. Fazendo uso da periodicidade dos senos que são multiplicados para fazer as transformadas, a *FFT* reduziu drasticamente o montante de cálculos requeridos. Em cada estágio de processamento, os resultados do estágio anterior são combinados de uma maneira especial. Finalmente, este calcula a *DFT* para cada conjunto de dados. O algoritmo da *FFT* pode ser usado para detectar vários tipos de falhas no motor.

#### 4.2.2 Short-Time Fourier Transform (STFT)

O trabalho de Fourier tem como foco o desenvolvimento e a análise de soluções para funções infinitas onde as propriedades estatísticas da função não mais se alteram. Sinais estacionários possuem tal comportamento em regime permanente.

Sinais adquiridos, por outro lado, raramente possuem tais propriedades, devido a características do processo de aquisição e do fenômeno observado. Portanto, a aplicação da análise de Fourier a sinais adquiridos leva a erros não considerados no trabalho de Fourier. Em outras palavras, a não-idealidade da análise de Fourier para sinais não-



estacionários é a origem de tais fontes de incerteza. Por esses motivos, foram desenvolvidas várias ferramentas para melhoria da estimação de componentes de frequência, ferramentas essas que estão localizadas tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo. Um exemplo desse tipo de ferramenta de análise de domínio tempo-frequência é a *Short-Time Fourier Transform (STFT)*.

A *STFT*, também conhecido como *Short-Term Fourier Transform* ou ainda como *Windowed Fourier Transform*, é uma transformada utilizada para determinar a frequência senoidal e o conteúdo de fase de seções locais de um sinal cujo espectro varia ao longo do tempo. Na prática, o procedimento para calcular a *STFT* é dividir um sinal de maior tempo em segmentos mais curtos de igual comprimento e depois calcular a Transformada de Fourier separadamente em cada segmento [67]. Uma vez o espectro de cada segmento estando calculado, geralmente é traçado as mudanças no espectro como uma função do tempo.

Do ponto de vista matemático, o método consiste em multiplicar a função a ser transformada por uma Função Janela que não é nula somente por um curto período de tempo. A Transformada de Fourier do sinal resultante é tomada à medida que a janela é deslocada ao longo do eixo do tempo, resultando numa representação bidimensional do sinal. Isso pode ser escrito, no tempo contínuo, como na equação (4.5) [68]:

$$X(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt, \quad (4.5)$$

Onde:

$X(\omega, \tau)$  = sinal no domínio da frequência;

$x(t)$  = sinal no domínio do tempo;

$w(t - \tau)$  = função janela;

$\tau$  = index para deslocamento da função janela no eixo tempo;

$j$  = representação de número imaginário;

$\omega$  = frequência [rad/s];

$t$  = tempo.

A principal vantagem da análise espectral dependente do tempo é descobrir os padrões de mudança das frequências, que usualmente representam a natureza do sinal. Enquanto este padrão é identificado, a falha da máquina associada com este padrão pode ser também identificada. Outra característica importante da análise de frequência dependente do tempo é a sua capacidade de filtrar uma determinada componente de

frequência usando um filtro com características passíveis de variação no tempo [69].

#### 4.2.3 *Wavelet Transform (WT)*

Assim como a *STFT*, a *Wavelet Transform (WT)* é também uma ferramenta de análise de domínio tempo-frequência. Porém enquanto a *STFT* apresenta como limitação a resolução fixa no domínio tempo-frequência, ou seja, componentes de alta frequência são analisados com a mesma resolução que componentes de baixa frequência, na *WT* os algoritmos processam os dados em diferentes resoluções. Se olharmos para um sinal (ou uma função) através de uma grande "janela", notaremos características mais globais do sinal. De maneira similar, se olharmos para um sinal através de uma pequena "janela", notaremos pequenas características do sinal. O resultado na análise *Wavelet* é ver tanto a floresta como as árvores, por assim dizer [70].

A *WT* é diferente de outros métodos de processamento de sinal. Esta está localizada tanto no domínio da frequência como no domínio do tempo devido aos *wavelets* possuírem duração limitada no tempo e largura de banda limitada na frequência. A *WT* representa um sinal com uns poucos coeficientes. Superando as desvantagens da *FFT* e da *STFT*, a *WT* fornece um tamanho de janela variável. Esta ganhou aceitação generalizada no processamento de sinais e compressão de imagem, devido à sua natureza inerente de multi-resolução. A *WT* decompõe um sinal em um conjunto de funções de base. Estas funções de base são chamadas de *wavelets*. *Wavelets* são obtidos a partir de um único protótipo *wavelet* chamado *Mother Wavelet*, através de dilatações e deslocamento. A *WT* é calculada separadamente para diferentes segmentos do sinal no domínio do tempo e em diferentes frequências. Coeficientes de *Wavelet*, a um primeiro nível de decomposição, são obtidos a partir de um sinal em análise pela aplicação de uma *mother wavelet*. O processo pode ser repetido se a *mother wavelet* é dimensionada e transladada [35].

A forma geral de uma função *wavelet* está definida na equação (4.6), onde uma função  $\Psi$ , conhecida como *mother wavelet*, é escalonada e deslocada no tempo [70]:

$$\psi_{t_0,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \left( \frac{t-t_0}{s} \right), \quad (4.6)$$

Onde:

$\psi_{t_0,s}(t)$  = função *wavelet*;

$\Psi$  = mother wavelet;

$t_0$  = instante de tempo de interesse;

$S$  = escala utilizada;

$t$  = tempo.

A  $WT$  na sua forma integral então pode ser escrita como na equação (4.7) [70]:

$$X(t_0, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{t_0, S}(t) dt, \quad (4.7)$$

Onde:

$X(t_0, S)$  = sinal no domínio tempo-frequência;

$x(t)$  = sinal no domínio do tempo;

$\psi_{t_0, S}(t)$  = função wavelet;

$t_0$  = instante de tempo de interesse;

$S$  = escala utilizada;

$t$  = tempo.



## 5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DE *MCSA* PARA DETECÇÃO DE EXCENTRICIDADES

### 5.1 Metodologia

Técnicas de monitoramento das correntes do estator para a determinação da excentricidade do rotor/entreferro têm sido utilizadas em grandes máquinas e em máquinas de médio porte, ou seja, máquinas trifásicas. Somente após um melhor entendimento de todo o contexto será possível a aplicação destas técnicas para motores de pequeno porte, motores monofásicos.

Além dos estudos teóricos, foram feitas também uma série de validações experimentais. Amostras de motores de indução monofásicos do tipo rotor gaiola de esquilo, utilizados em compressores herméticos, foram utilizadas. Os parâmetros de entrada previstos a serem variados com vistas a verificar o impacto na saída de cada configuração *MCSA* utilizada são:

- diâmetro interno do estator;
- diâmetro externo do rotor;
- altura de pacote;
- entreferro nominal;
- tipos de excentricidade do rotor/entreferro;
- graus de excentricidade do rotor/entreferro;
- potência do motor de indução.

Para dar prosseguimento ao trabalho, após os estudos teóricos foram definidas as configurações de entreferros não uniformes que constituiriam os experimentos, assim como quais as técnicas de processamento de sinais que iriam compor as configurações *MCSA*.

Primeiramente, todo o estudo e a avaliação serão aplicados em um único modelo de motor de indução monofásico, utilizado nos compressores de refrigeração da empresa parceira deste trabalho. De preferência, por facilidade de se dispor de instrumentação adequada e para avaliar a aplicabilidade da técnica em motores de pequeno porte, este modelo de motor deve de ser um dos de maior potência utilizados. Após conclusão de qual a melhor configuração *MCSA* a ser utilizada, esta foi validada também em mais 1 (um) modelo de motor, sendo que este deve ser um dos menos potente motores utilizados pela empresa.

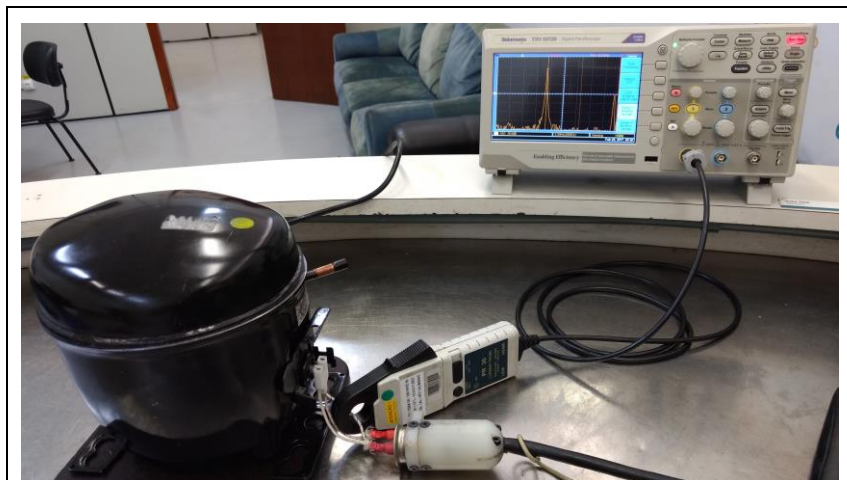
Todos os experimentos foram realizados em ambiente laboratorial, tendo como parâmetros de avaliação da sua possível aplicabilidade

nas linhas de montagem a capacidade de medição do entreferro (sensibilidade).

### 5.1.1 Arranjo experimental empregado

Em se tratando da parte experimental, o principal objetivo é o de validar a aplicabilidade da técnica *MCSA* mostrando que essa possui sensibilidade suficiente para análise do entreferro de motores de indução monofásico presentes em compressores herméticos.

Sendo assim, optou-se pela utilização de um arranjo de baixa complexidade. Esse arranjo consiste de osciloscópio, sonda de corrente, painel de partida/alimentação e compressor hermético (Figura 5.1).

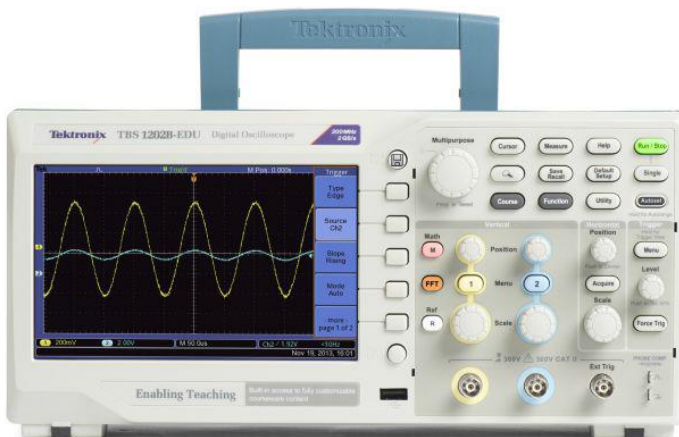


Fonte: Autor

Figura 5.1 – Arranjo experimental empregado

O osciloscópio escolhido foi um Tektronix modelo TBS 1072B-EDU (Figura 5.2) que tem como principais características:

- Largura de banda de 70 MHz;
- Taxa de aquisição de até 1 GS/s;
- Função *FFT* para análise do sinal no domínio da frequência;
- Função Janela *Hanning*, *Flat Top* e *Rectangular* para serem aplicadas em conjunto com a *FFT*;
- Modos de aquisição *Sample*, *Peak Detect* e *Average*.



Fonte: [71]

Figura 5.2 – Osciloscópio Tektronix TBS 1072B-EDU

A sonda de corrente selecionada foi uma LEM modelo PR 30 (Figura 5.3) cujas características de maior relevância são:

- Largura de banda de 100 kHz;
- Intervalo de medição ( $AC_{RMS}$  ou DC) de 20 A;
- Sensibilidade de saída de 100 mV/A;
- Resolução de  $\pm 1$  mA;
- Incerteza instrumental (25°C) de  $\pm 1\%$  da leitura  $\pm 2$  mA;
- Deriva térmica de  $\pm 0,01\%/^{\circ}C$ .



Fonte: [72]

Figura 5.3 – Sonda de corrente LEM PR 30

Devido à diversidade de motores de indução monofásicos utilizados em compressores herméticos, como visto no item 2.2, foi necessário incluir no arranjo experimental um painel de partida/alimentação (Figura 5.4). Este painel apresenta como recursos principais:

- Ajuste de tensão de 0 V a 245 V;
- Emulação dos diversos dispositivos de partida (Relé de corrente, *PTC*, *TSD*);
- Temporizador para ajustar tempo de bobina auxiliar ligada;
- Medidor de potência ativa;
- Transformador isolador.





Fonte: Autor

Figura 5.4 – Pannel de partida/alimentação

### 5.1.2 Descrição das amostras

Foram selecionados 2 (dois) modelos de compressores herméticos, que se utilizam de motores de indução monofásicos do tipo rotor gaiola de esquilo, para fazerem parte dessa pesquisa. Um é o maior compressor produzido no Brasil pela empresa que aprovou técnica e financeiramente a realização deste trabalho e o outro é um dos menores compressores dessa mesma planta. Os principais parâmetros desses dois compressores são apresentados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Especificações e Parâmetros construtivos das amostras

<b>Parâmetros</b>	<b>COMPRESSOR A</b>	<b>COMPRESSOR B</b>
<b>Capacidade de Refrigeração</b>	1670 Btu/h	307 Btu/h
<b>Gás refrigerante</b>	R290	R134a
<b>Potência</b>	1/2 hp	1/10 hp
<b>Alimentação</b>	220 V/60 Hz	220 V/60 Hz
<b>Corrente nominal</b>	2,64 A	0,48 A
<b>Tipo de motor</b>	<i>CSIR</i>	<i>RSIR</i>
<b>Torque de partida</b>	<i>HST</i>	<i>LST</i>
<b>Número de pólos</b>	2	2
<b>Altura de pacote</b>	47,5 mm	35,0 mm
<b>Diâmetro interno do estator</b>	63,04 mm	60,08 mm
<b>Número de ranhuras do estator</b>	24	24
<b>Diâmetro externo do rotor</b>	62,40 mm	59,53 mm
<b>Número de barras do rotor</b>	28	28
<b>Entreferro</b>	0,320 mm	0,275 mm

### 5.1.3 Implementação da excentricidade do rotor

Conforme indicado na Tabela 5-1, os entreferros nominais dos motores de indução dos compressores selecionados são pequenos. O pequeno entreferro faz com que a implementação da excentricidade do rotor torne-se difícil. Isso resulta em incertezas consideráveis nos graus de excentricidade configurados.

No caso da excentricidade estática, essa foi criada utilizando-se de lâminas de folga. Duas condições foram implementadas usando-se de 4 (quatro) espessuras diferentes de lâminas, sendo essas espessuras 0,279 mm, 0,228 mm, 0,177 mm e 0,152 mm. A primeira condição é uma condição de baixa excentricidade estática que consiste no melhor posicionamento possível, do ponto de vista de concentricidade, durante a montagem do par estator e rotor. A verificação da qualidade desse posicionamento, garantindo-se assim uma condição de baixa excentricidade, foi realizada através da utilização da lâmina de folga de 0,279 mm para o compressor COMPRESSOR A e da lâmina de 0,228 mm para o compressor COMPRESSOR B. Foi circundado todo o perímetro da região do entreferro com essa lâmina sendo o critério de aceitação da

condição a passagem livre da lâmina. A segunda condição é uma condição com alto grau de excentricidade estática. Essa foi implementada colocando-se a lâmina de folga 0,152 mm em uma posição da região do entreferro e montado o par estator e rotor de maneira a pressionar a lâmina. A verificação da condição foi realizada circundando o perímetro da região do entreferro com as lâminas de 0,152 mm e 0,177 mm. O critério de aceitação da condição foi a passagem “apertada” da lâmina de 0,152 mm e a não passagem da lâmina de 0,177 mm.

No caso da excentricidade dinâmica esta não foi implementada de maneira controlada. Os graus de excentricidade dinâmica das amostras foram consequências naturais do processo de fabricação dos rotores. O que foi feito foi apenas mapear através da medição do batimento total radial a condição que se encontravam os rotores de cada amostra.

#### 5.1.4 Procedimento e frequências analisadas

O mesmo procedimento foi empregado em ambos os tipos de compressores selecionados e para ambos os graus de excentricidade estática. O procedimento consiste das seguintes etapas:

- Posicionar o par estator e rotor do compressor na condição de excentricidade estática desejada;
- Conectar o compressor no painel de partida/alimentação;
- Conectar a sonda de corrente no condutor fase da alimentação (ponto comum entre bobina principal e auxiliar);
- Ligar o osciloscópio e selecionar a função *FFT*;
- Energizar/partir o compressor sem carga;
- Após o transitório de partida, adquirir o sinal de corrente registrando/salvando o espectro nas faixas de frequência de interesse.

As frequências de interesse foram escolhidas de acordo com as equações (4.1) e (4.2) e são apresentadas na Tabela 5-2 e na Tabela 5-3.

Tabela 5-2 – Frequências de interesse de acordo com a equação (4.1)

$f_s = 60 \text{ Hz}, k = 1, R = 28, p = 1, s = 0,0167, v = +1$			
$f_{ecc,HF}$			
$n_d = -1$	$n_d = 0$	$n_d = +1$	$n_d = +2$
1653 Hz	1712 Hz	1771 Hz	1830 Hz

Tabela 5-3 – Frequências de interesse de acordo com a equação (4.2)

$f_s = 60 \text{ Hz}, p = 1, s = 0,0167$		
$f_{ecc,LF}$		
$k = +1$	$k = +3$	$k = +5$
119 Hz	237 Hz	355 Hz

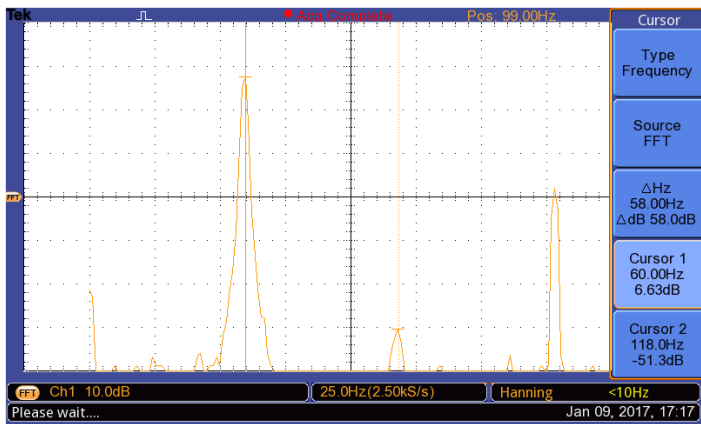
## 5.2 Resultados

Os experimentos em laboratório foram realizados de acordo com a metodologia, arranjo e procedimento, definidos. Foram utilizados 5 (cinco) exemplares de cada modelo de compressor. Devido ao grande número de capturas do espectro do sinal da corrente de alimentação, a totalidade destas se encontram disponíveis no APÊNDICE A.

### 5.2.1 Excentricidade estática ( $SE$ )

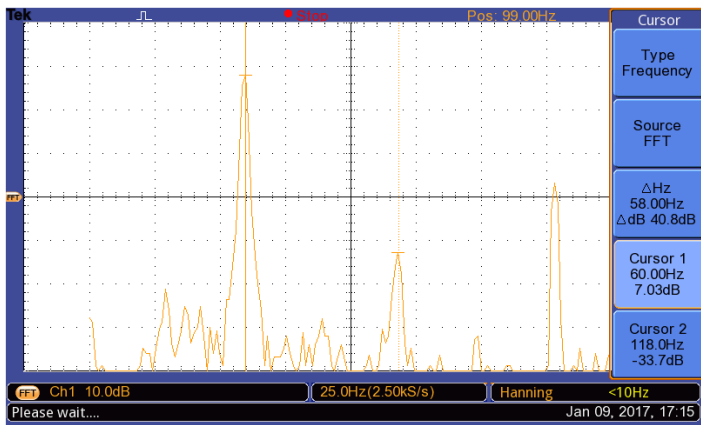
Devido ao tamanho do entreferro ser distinto entre os modelos de compressor selecionados, o procedimento de implementação da condição de alto grau de excentricidade, utilizando-se da lâmina de folga de 0,152 mm, resulta em graus de excentricidade diferentes para cada motor. No caso do motor do COMPRESSOR A, isso significa um deslocamento de 0,168 mm ou de 52,5% em termos relativos. Já no caso do motor do COMPRESSOR B o deslocamento é menor, sendo de 0,123 mm ou 44,7%.

Para exemplificar o comportamento do espectro, as figuras a seguir (Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12) mostram as amplitudes das frequências de interesse, tanto na condição de baixa excentricidade como na condição de alta excentricidade, para a amostra 1 do modelo COMPRESSOR A.



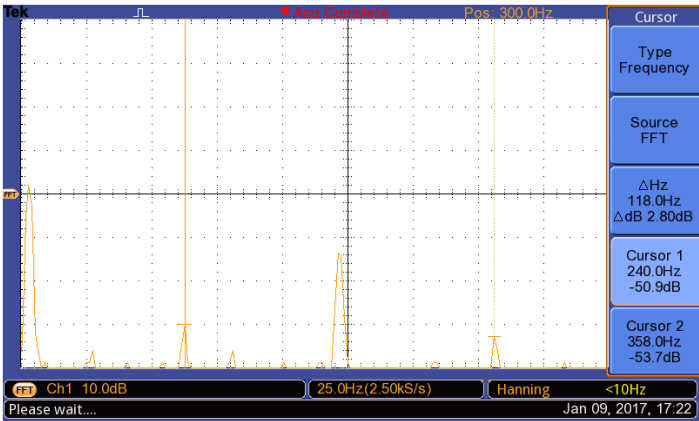
Fonte: Autor

Figura 5.5 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



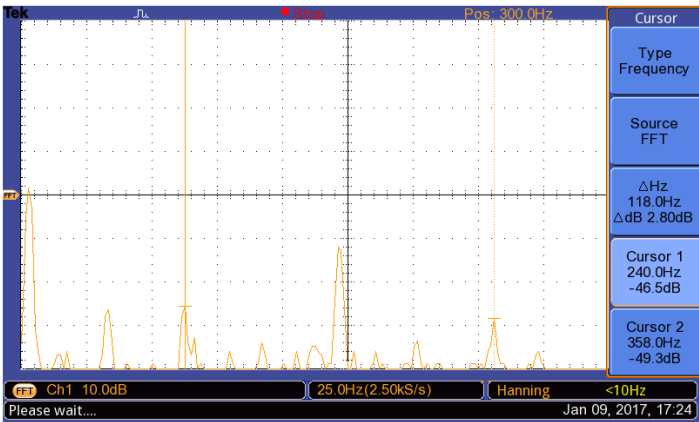
Fonte: Autor

Figura 5.6 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



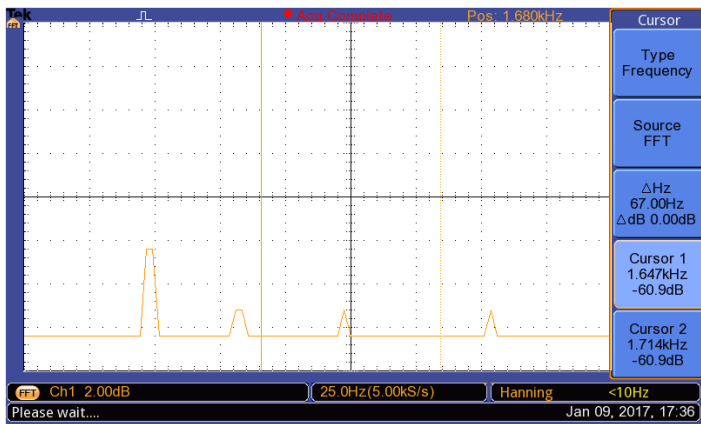
Fonte: Autor

Figura 5.7 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



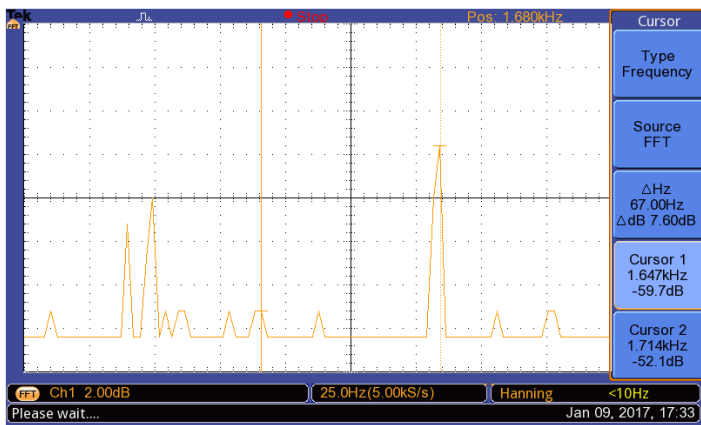
Fonte: Autor

Figura 5.8 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



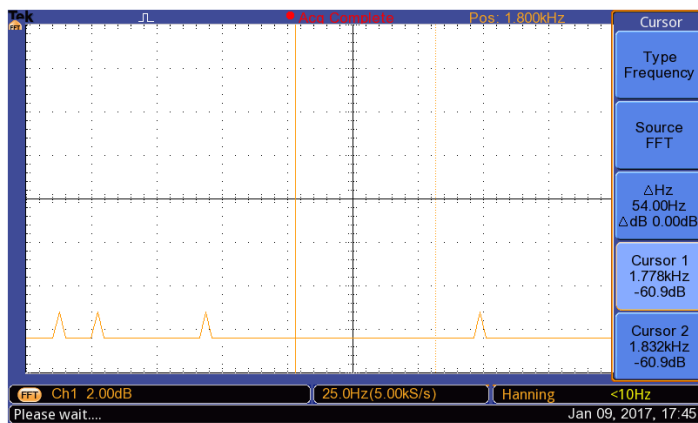
Fonte: Autor

Figura 5.9 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



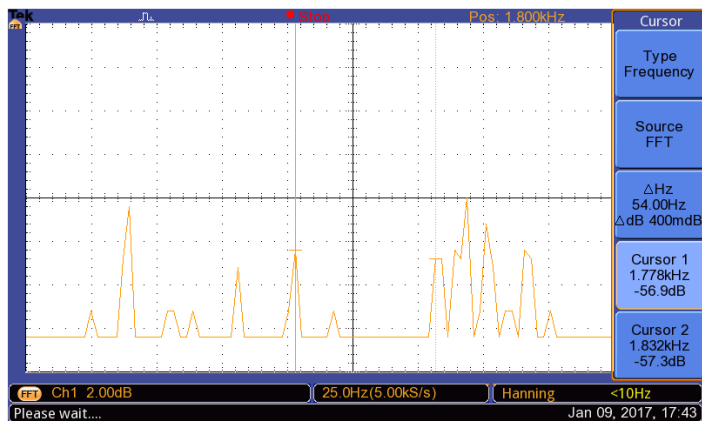
Fonte: Autor

Figura 5.10 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



Fonte: Autor

Figura 5.11 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



Fonte: Autor

Figura 5.12 – Amostra 1 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 7,2\%$ )



Na Tabela 5-4 encontram-se os resultados de magnitude (*Power Spectral Density* - *PSD*) das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais da frequência de alimentação para todas as cinco amostras do COMPRESSOR A.

Tabela 5-4 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais da frequência de alimentação (COMPRESSOR A)

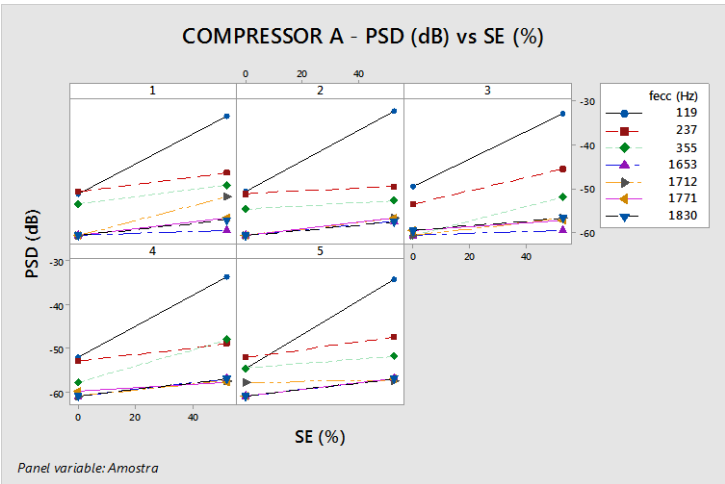
$f_{ecc,LF}$ - <i>PSD</i> (dB)					
Amostra	SE (%)	DE (%)	119 Hz	237 Hz	355 Hz
1	0	7,2	-51,3	-50,9	-53,7
1	52,5	7,2	-33,7	-46,5	-49,3
1	$\Delta$		17,6	4,4	4,4
2	0	9,1	-50,9	-51,3	-54,9
2	52,5	9,1	-32,5	-49,7	-52,9
2	$\Delta$		18,4	1,6	2,0
3	0	19,7	-49,7	-53,7	-60,9
3	52,5	19,7	-32,9	-45,7	-52,1
3	$\Delta$		16,8	8,0	8,8
4	0	10,9	-52,1	-52,9	-57,7
4	52,5	10,9	-33,7	-48,9	-48,1
4	$\Delta$		18,4	4,0	9,6
5	0	14,1	-54,5	-52,1	-54,5
5	52,5	14,1	-34,1	-47,3	-51,7
5	$\Delta$		20,4	4,8	2,8

Na Tabela 5-5 encontram-se os resultados de *PSD* das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais das frequências de ranhura para todas as cinco amostras do COMPRESSOR A.

Tabela 5-5 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais das frequências de ranhura (COMPRESSOR A)

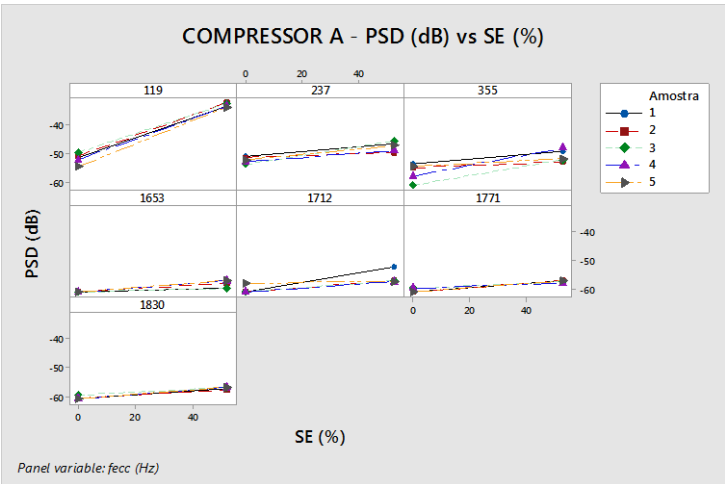
$f_{ecc,HF}$ - PSD (dB)						
Amostra	SE (%)	DE (%)	1653 Hz	1712 Hz	1771 Hz	1830 Hz
1	0	7,2	-60,9	-60,9	-60,9	-60,9
1	52,5	7,2	-59,7	-52,1	-56,9	-57,3
1	$\Delta$		1,2	8,8	4,0	3,6
2	0	9,1	-60,9	-60,9	-60,9	-60,9
2	52,5	9,1	-57,7	-56,9	-56,9	-57,7
2	$\Delta$		3,2	4,0	4,0	3,2
3	0	19,7	-60,9	-60,9	-59,7	-59,7
3	52,5	19,7	-59,7	-56,9	-57,3	-56,9
3	$\Delta$		1,2	4,0	2,4	2,8
4	0	10,9	-60,9	-60,9	-59,7	-60,9
4	52,5	10,9	-56,9	-57,3	-57,7	-56,9
4	$\Delta$		4,0	3,6	2,0	4,0
5	0	14,1	-60,9	-57,7	-60,9	-60,9
5	52,5	14,1	-56,9	-57,3	-56,9	-56,9
5	$\Delta$		4,0	0,4	4,0	4,0

Utilizando-se de gráficos de dispersão fica mais simples perceber o nível de variação entre as cinco amostras do COMPRESSOR A (Figura 5.13), assim como comparar a sensibilidade de cada frequência de interesse frente aos graus de SE impostos (Figura 5.14).



Fonte: Autor

Figura 5.13 – Gráfico de dispersão  $PSD$  (dB) vs  $SE$  (%) separado por amostra (COMPRESSOR A)



Fonte: Autor

Figura 5.14 – Gráfico de dispersão  $PSD$  (dB) vs  $SE$  (%) separado por frequência (COMPRESSOR A)

Da mesma forma, apresentam-se os resultados do COMPRESSOR B. Na Tabela 5-6 encontram-se os resultados de *PSD* das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais da frequência de alimentação para as cinco amostras.

Tabela 5-6 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais da frequência de alimentação (COMPRESSOR B)

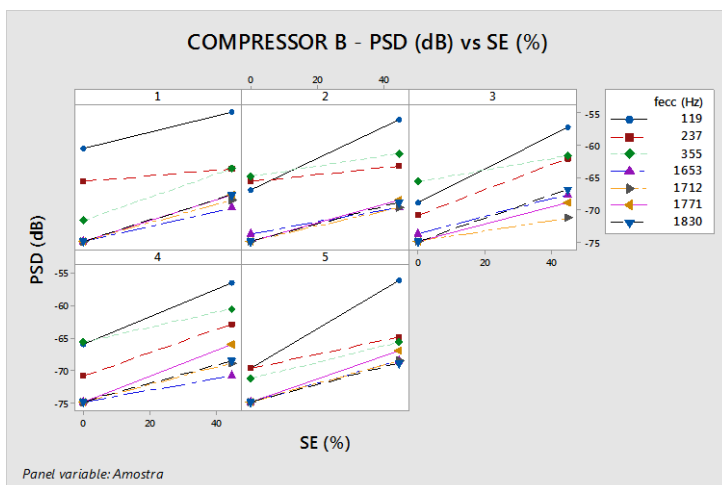
$f_{ecc,LF} - PSD$ (dB)					
Amostra	SE (%)	DE (%)	119 Hz	237 Hz	355 Hz
1	0	6,2	-60,5	-65,7	-71,7
1	44,7	6,2	-54,9	-63,7	-63,7
1	$\Delta$		5,6	2,0	8,0
2	0	9,5	-66,9	-65,7	-64,9
2	44,7	9,5	-56,1	-63,3	-61,3
2	$\Delta$		10,8	2,4	3,6
3	0	12,0	-68,9	-70,9	-65,7
3	44,7	12,0	-57,3	-62,1	-61,7
3	$\Delta$		11,6	8,8	4,0
4	0	7,6	-66,1	-70,9	-65,7
4	44,7	7,6	-56,5	-62,9	-60,5
4	$\Delta$		9,6	8,0	5,2
5	0	16,7	-69,7	-69,7	-71,3
5	44,7	16,7	-56,1	-64,9	-65,7
5	$\Delta$		13,6	4,8	5,6

Para as frequências de excentricidade localizadas nas bandas laterais das frequências de ranhura, os resultados das cinco amostras encontram-se na Tabela 5-7.

Tabela 5-7 – Resultados da magnitude das frequências de interesse localizadas nas bandas laterais das frequências de ranhura (COMPRESSOR B)

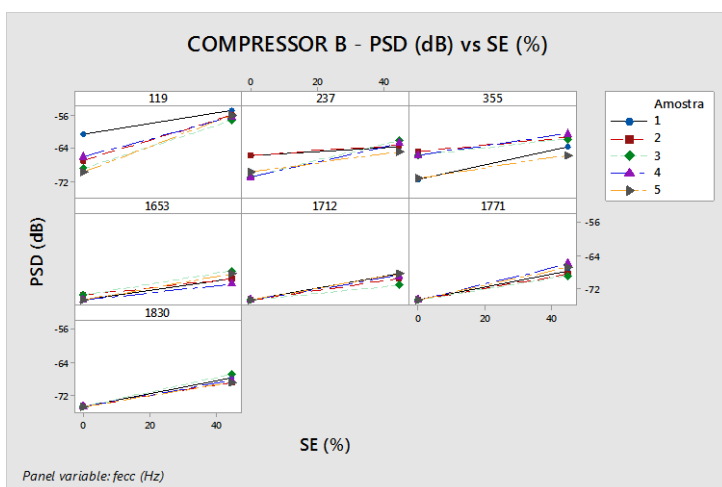
$f_{ecc,HF}$ - PSD (dB)						
Amostra	SE (%)	DE (%)	1653 Hz	1712 Hz	1771 Hz	1830 Hz
1	0	6,2	-74,9	-74,9	-74,9	-74,9
1	44,7	6,2	-69,7	-68,5	-67,7	-67,7
1	$\Delta$		5,2	6,4	7,2	7,2
2	0	9,5	-73,7	-74,9	-74,9	-74,9
2	44,7	9,5	-69,7	-69,7	-68,5	-68,9
2	$\Delta$		4,0	5,2	6,4	6,0
3	0	12,0	-73,7	-74,9	-74,9	-74,9
3	44,7	12,0	-67,7	-71,3	-68,9	-66,9
3	$\Delta$		6,0	3,6	6,0	8,0
4	0	7,6	-74,9	-74,9	-74,9	-74,9
4	44,7	7,6	-70,9	-68,9	-66,1	-68,5
4	$\Delta$		4,0	6,0	8,8	6,4
5	0	16,7	-74,9	-74,9	-74,9	-74,9
5	44,7	16,7	-68,5	-68,5	-66,9	-68,9
5	$\Delta$		6,4	6,4	8,0	6,0

Apresenta-se também de forma visual o nível de variação entre as amostras do COMPRESSOR B (Figura 5.15), assim como a variação na magnitude de cada frequência de interesse de acordo com o grau de SE imposto (Figura 5.16).



Fonte: Autor

Figura 5.15 – Gráfico de dispersão  $PSD$  (dB) vs  $SE$  (%) separado por amostra (COMPRESSOR B)



Fonte: Autor

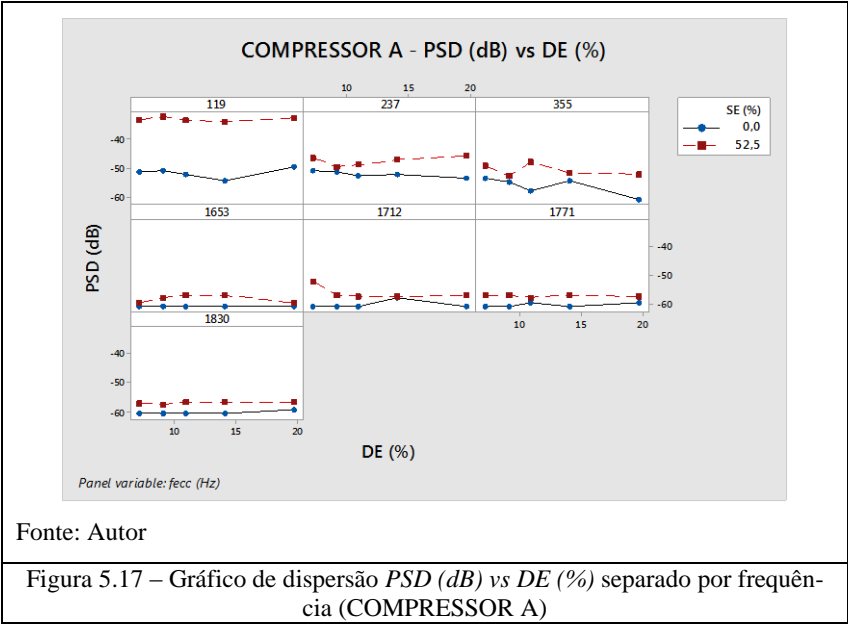
Figura 5.16 – Gráfico de dispersão  $PSD$  (dB) vs  $SE$  (%) separado por frequência (COMPRESSOR B)

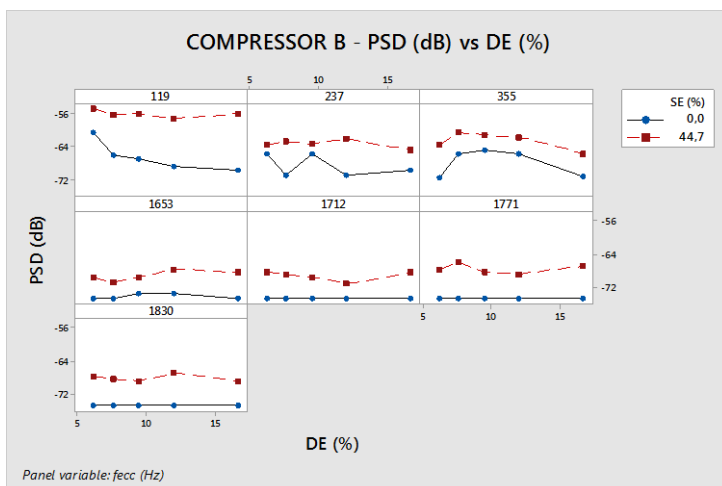
Os resultados apresentados mostram que as frequências devido à excentricidade previstas pelas equações (4.1) e (4.2) apresentaram incrementos significantes em suas magnitudes com o aumento da *SE*. Destaque para a frequência de 119 Hz, que se manifestou a mais sensível com incrementos médios de 18,3 dB no COMPRESSOR A, para uma *SE* de 52,5%, e de 10,2 dB no COMPRESSOR B, para uma *SE* de 44,7%.

5.2.2 Excentricidade dinâmica (*DE*)

Apesar de a *DE* não ter sido implementada de maneira controlada, se comportando nos experimentos como um ruído, o grau de excentricidade de cada amostra dos dois modelos de compressor foi mapeado através da medição do batimento total radial. Assim, pode-se verificar a influência dessas nos resultados de *PSD* das frequências de excentricidade.

As Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam graficamente o efeito da *DE* nas frequências de excentricidade para o compressor COMPRESSOR A e para o compressor COMPRESSOR B, respectivamente.





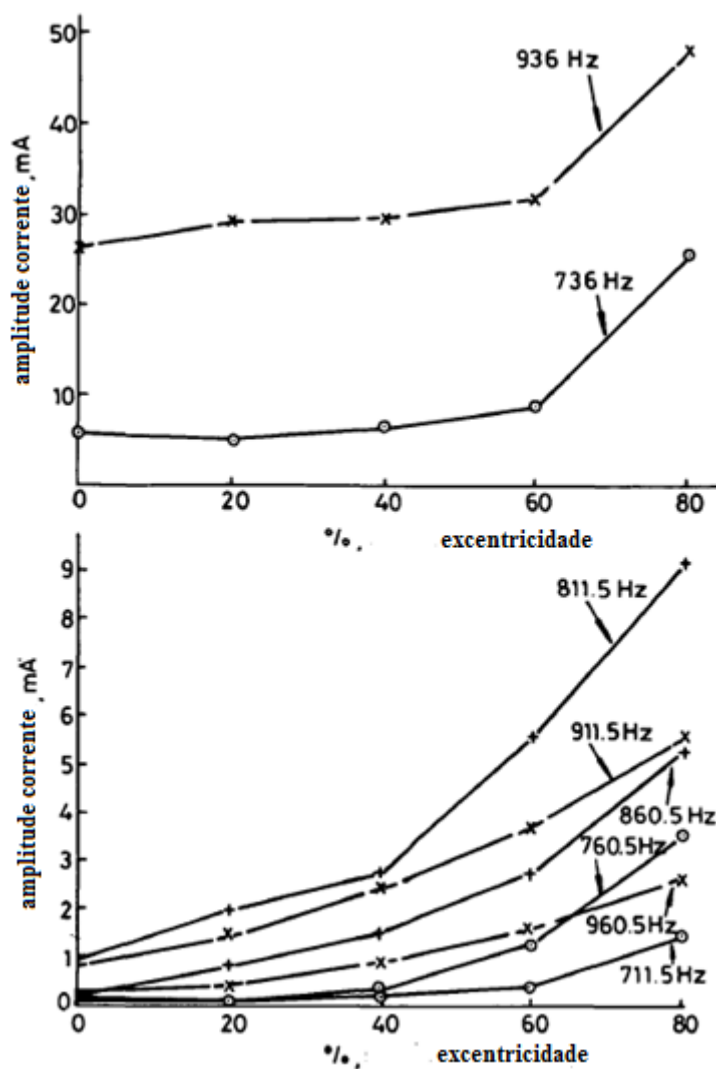
Fonte: Autor

Figura 5.18 – Gráfico de dispersão  $PSD$  (dB) vs  $DE$  (%) separado por frequência (COMPRESSOR B)

De acordo com os gráficos de dispersão, os graus de  $DE$ , contidos nos rotores das amostras de ambos os modelos de compressores, não resultaram em incrementos significativos nas frequências de excentricidade, não conseguindo se identificar nenhum comportamento padrão.

Conforme Cameron, Thomson e Dow [41], a sensibilidade das frequências de excentricidade ficam mais pronunciadas a partir de graus de excentricidade mais elevados, da ordem de 40% em diante (Figura 5.19). Como os rotores das amostras apresentaram  $DE$ 's entre aproximadamente 6% e 20%, o baixo nível de excentricidade dificultou a percepção da influência dessas com o arranjo experimental utilizado.





Fonte: adaptado de [41]

Figura 5.19 – Frequências de excentricidade vs % de excentricidade

### 5.3 Análise de resultados

O presente capítulo apresentou a metodologia empregada e os resultados obtidos na avaliação dos dois principais métodos *MCSA* de detecção de excentricidades do rotor/entreferro aplicados em dois modelos distintos de compressores herméticos.

Foram avaliados diferentes graus de *SE* assim como diferentes graus de *DE* em 5 (cinco) amostras de cada modelo de compressor. De um modo geral, os resultados encontrados indicam a possibilidade de aplicação dos métodos para o controle de qualidade do entreferro.

Na avaliação do comportamento das frequências de excentricidade frente à *SE* ficou evidente o aumento da amplitude dessas frequências alinhado com o aumento do grau de *SE*, tanto nas bandas laterais da frequência de alimentação como nas bandas laterais das frequências de ranhura. Esse aumento foi ainda mais expressivo na frequência de 119 Hz que além de ter apresentado a maior amplitude de variação, foi também a frequência que apresentou as menores dispersões relativas entre as amostras.

Já na avaliação do comportamento das frequências de excentricidade frente à *DE* não foi possível relacionar as variações na amplitude com as variações do grau de *DE*. Como já comentado no item 5.2.2, os baixos níveis de excentricidade acabaram atrapalhando a verificação da influência desse tipo de excentricidade com o arranjo experimental empregado.

## 6 CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões finais

O presente trabalho teve como objetivo geral agrupar conhecimento sobre métodos de medição/controlado do entreferro de motores de indução que se utilizam do sinal da corrente de alimentação. Tais técnicas *MCSA* foram desenvolvidas para serem aplicadas como métodos de manutenção preditiva de grandes máquinas elétricas, ou seja, máquinas trifásicas. Sendo assim, além de sintetizar informações, o trabalho teve como objetivo também analisar a aplicabilidade dos métodos para o controle da qualidade de entreferros de motores de indução monofásicos aplicados em compressores herméticos de refrigeração.

#### 6.1.1 Sobre as características e configurações do entreferro

Primeiramente iniciou-se um estudo das características do entreferro dos motores de indução através do estudo das diferentes configurações de excentricidade do rotor/entreferro. As principais causas foram conhecidas/citadas, sendo as oriundas de falhas mecânicas mais comuns em máquinas de médio e grande porte. No caso de compressores herméticos de refrigeração, por utilizarem motores de pequeno porte, as causas oriundas de imperfeições na fabricação dos componentes e no processo de montagem do par estator e rotor são as responsáveis por problemas de excentricidade, principalmente se tratando do controle de qualidade do entreferro na produção. Por fim, uma modelagem do problema de excentricidade foi realizada. Somente após o entendimento da *SE*, *DE* e *ME* pode-se o estudo avançar para o *MCSA*.

#### 6.1.2 Sobre os métodos de análise das correntes do estator

Sobre os métodos *MCSA*, uma revisão consistente do estado da arte foi realizada mostrando as principais linhas de pesquisa existentes na área, deixando claro que se trata de um campo com conhecimentos sólidos, mas ainda novo. Tem-se certa carência tanto de volume de trabalhos na área quanto de trabalhos que explorem diferentes aplicações. Para se ter uma ideia, o autor desta dissertação não encontrou nas bases de artigos, dissertações e teses disponíveis algum trabalho que tivesse aplicado tais técnicas em motores monofásicos. Também não se encontrou algum estudo que tivesse como objetivo o de aplicar as técnicas como um método de controle de qualidade no processo produtivo. Dian-

te deste fato, a presente dissertação ganha assim um caráter de originalidade e inovação para o trabalho aqui desenvolvido e inicializado.

### 6.1.3 Sobre a avaliação desses métodos no controle de qualidade do entreferro

Por se tratar do primeiro estudo do assunto dentro do grupo de pesquisa, da empresa parceira e com esse foco de aplicação, pelo que se tem conhecimento, o trabalho foi assim delimitado à validação do *MCSA* do ponto de vista de viabilidade técnica, verificando sua capacidade de medição do entreferro (sensibilidade). Experimentos foram realizados com dois modelos de compressor de capacidades de refrigeração diferentes e por consequência potências distintas, que se utilizam de motores de indução monofásicos de pequeno porte: motores fracionais (potências menores que 1 hp). Esse tipo de motor tem como característica entreferros de tamanhos bastante reduzidos. Ambos os métodos *MCSA*, análise do espectro na região de baixa e de alta frequência, foram utilizados empregando como técnica de processamento de sinal a *FFT*.

### 6.1.4 Sobre os resultados alcançados

Os resultados obtidos mostraram que, com a técnica proposta, é possível a detecção da presença e do grau de excentricidade em motores de indução monofásicos de compressores. Comparando os casos com baixo grau de *SE* com os casos de alto grau é possível observar a magnitude das frequências de excentricidade aumentar com o aumento da excentricidade. Esse aumento foi mais significativo na frequência de 119 Hz, que se localiza próxima da 1ª harmônica par da frequência de alimentação. Esta é uma região do espectro bastante interessante, pois, é uma região limpa de ruídos quando se fala em motores de indução. Observando as frequências localizadas na região da alta frequência, frequências de ranhura, essa condição de ausência de ruídos já não existe, ficando mais difícil sua análise devido ao fato das amplitudes serem menores. A utilização de filtros e de outras transformadas para atenuação e/ou remoção da frequência fundamental, em conjunto com a *FFT*, auxiliaria as frequências de ranhura a apresentarem magnitudes mais notáveis, comparadas às harmônicas de maior ordem. Sobre a *DE* nada se pode concluir, pois, devido ao baixo grau de excentricidade apresentados pelos rotores das amostras, seus efeitos ficaram confundidos com a variação total da *PSD* das frequências de interesse.

Para permitir que os métodos *MCSA* possam ser utilizados para a tomada de decisões sobre a condição/qualidade do entreferro dos compressores, o grau de severidade da excentricidade tem de ser quantificado. Trabalhos futuros precisarão ser desenvolvidos para prever/mapear a magnitude das frequências de interesse em função da excentricidade. Isso significa que os limites de controle precisam ser determinados de acordo com o grau de excentricidade aceito por projeto. Somente após mais testes de avaliação para refinamento, um instrumento de diagnóstico dedicado poderá ser desenvolvido. Esta fase de avaliação é essencial para garantir que a técnica de diagnóstico obtenha assertividade e credibilidade metrológica.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Um leque de oportunidades para pesquisas futuras se abre com o trabalho inicial e pioneiro aqui desenvolvido.

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Construção de uma bancada micrométrica, com o objetivo de diminuir a incerteza relativa ao grau de excentricidade, para que seja possível determinar limites de controle eficazes;
- Estudo da aplicação de outras técnicas de processamento de sinal com o intuito de deixar mais evidente as magnitudes das frequências de excentricidade, aumentando assim a relação sinal ruído e diminuindo a incerteza relativa à magnitude;
- Estudo dos efeitos de outros erros geométricos, além dos erros radiais de posição que levam à excentricidade do rotor como, por exemplo, erros no sentido axial;
- Construção de um sistema de medição de diagnóstico dedicado, pois não existe equivalente no mercado, cabendo inclusive depósito de patentes para tal desenvolvimento.



## REFERÊNCIAS

- [1] PACHECO, A. L. S. **Desenvolvimento de sistema para medir a resistência de enrolamento em motores de compressores energizados**. 180 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [2] GIESEL, T. **Estudo e projeto de motores de alta velocidade para aplicação em compressores herméticos**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [3] VEINOTT, C. G. **Theory and design of small induction motors**. New York, NY. McGraw-Hill, 1959.
- [4] RUTHES, J. R. **Análise dos torques síncronos em motores de indução monofásicos**. 92 f. Dissertação, (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [5] BAJEC, P.; FISER, R.; AMBROZIC, V.; NASTRAN, J. **Detection of induction motor squirrel cage asymmetry using dynamic torque spectrum analysis**. 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003, p. 110 – 114, 2003.
- [6] EMBRACO. **Material do Treinamento: Compressores Herméticos**. Joinville, 1988.
- [7] HENKLEIN, P. **Análise de Ensaios de Desempenho de Compressores Herméticos Durante o Transitório**. 2006. 136f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [8] EMBRACO. **Material do Treinamento: Curso de aplicação de compressores**. Joinville, 1987.
- [9] STOECKER, W. F.; JABARBO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

- [10] SERRANO, J. **Numerical simulation and experimental validation of hermetic reciprocating compressors: integration in vapour compression refrigerant system.** Tese (Thesis Doctoral) – Catalunha Politechnic University, Terrassa, 2002.
- [11] EMBRACO. **Banner Compressor Família EG.** Joinville, 2010.
- [12] KRAUSE, P. C. **Analysis of electric machinery.** New York, NY. McGraw-Hill, 1986.
- [13] WEG S. A. **Motores elétricos: Guia de especificação.** WEG. Jaraguá do Sul, 2012.
- [14] EMBRACO. **Componentes elétricos dos compressores Embraco.** 4ª ed. Joinville, 2009.
- [15] SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics.** John Wiley and Sons, 1989.
- [16] BEATY, W.; KIRTLEY, J. **Electric motor handbook.** USA. McGraw-Hill, 1998.
- [17] BARR H.; BONNETT A.; YUNG, C. **Understanding the design of stators and rotors of squirrel cage induction motors.** 55th IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2008. PCIC 2008, p. 1 –11, 2008.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 5457:1980** - Eletrotécnica e eletrônica: Máquinas girantes: terminologia.
- [19] CAVIATIVA, J. A. C. **Avaliação dos ensaios de descargas parciais e de rotor bloqueado como formas de detecção de defeitos de fabricação em estatores de motores de indução monofásicos.** 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [20] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência.** 6ª ed. New York, NY. McGraw-Hill, 2006.
- [21] PACHECO, R. L. **Apostila da Disciplina: Conversão eletromecânica de energia B.** UFSC, 2010.
- [22] SILVEIRA, A. N. **Diminuição do tempo de transitório em ensaios de desempenho de compressores utilizando injeção de corren-**



- te contínua.** 256 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [23] CUBILLA, R. M. **Detecção de falhas em motores de indução trifásicos com rotor de gaiola em funcionamento.** 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
  - [24] BONE, J. C.; SCHWARZ, K. K. **Large ac motors.** IEE Proceedings, v. 120, n. 10, p. 1111-1132, 1973.
  - [25] RAWICKI, S. **Damages of windings of a three-phase slip-ring induction machine having parallel paths in the stator or in the rotor.** Archiv fur Elektrotechnik, v. 71, n. 4, p. 257-274, 1988.
  - [26] TORKAMAN, H.; AFJEI, E. **Sensorless method for eccentricity fault monitoring and diagnosis in switched reluctance machines based on stator voltage signature.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 29, n. 2, p. 912-920, 2013.
  - [27] FAIZ, J.; OJAGHI, M. **Instantaneous-power harmonics as indexes for mixed eccentricity fault in mains-fed and open/closed-loop drive-connected squirrel-cage induction motors.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 56, n. 11, p. 4718-4726, 2009.
  - [28] ROBINSON, J.; WHELAN, C. D.; HAGGERTY, N. K. **Trends in advanced motor protection and monitoring.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 40, n. 3, p. 853-860, 2004.
  - [29] IEEE STANDARDS ASSOCIATION (IEEE SA). **IEEE Std. 493: 1997** – IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems.
  - [30] VAS, P. **Parameter estimation, condition monitoring and diagnosis of electrical machines.** Oxford, OXON. Clarendon Press, 1993.
  - [31] BENBOUZID, M. E. H. **A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 47, n. 5, p. 984-993, 2000.

- [32] YANG, W.; TAVNER, P. J.; CRABTREE, C. J.; WILKINSON M. **Cost-Effective condition monitoring for wind turbines.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 57, n. 1, p. 263-271, 2010.
- [33] YANG, W.; TAVNER, P. J.; WILKINSON, M. **Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train.** IET Renewable Power Generation, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2009.
- [34] YANG, W.; TAVNER, P. J.; CRABTREE, C. J.; WILKINSON M. **Research on a simple, cheap but globally effective condition monitoring technique for wind turbines.** 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, ICEM 2008, p. 1-5, 2008.
- [35] KALASKAR, C. S.; GOND, V. J. **Motor current signature analysis to detect the fault in induction motor.** Journal of Engineering Research and Applications, v. 4, n. 6, p. 58-61, 2014.
- [36] BELLINI, A.; FILIPPETTI, F.; TASSONI, C.; CAPOLINO, G. A. **Advances in diagnostic techniques for induction machines.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 12, p. 4109-4126, 2008.
- [37] FAIZ, J.; EBRAHIMI, B. M.; AKIN, B.; TOLİYAT, H. A. **Comprehensive eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 45, n. 3, p. 1764-1767, 2009.
- [38] TAVNER, P. J. **Review of condition monitoring of rotating electrical machines.** IET Electric Power Applications, v. 2, n. 4, p. 215-247, 2008.
- [39] STEFANI, A. **Induction motor diagnosis in variable speed drives.** Tese (Ph.D. in Electrical Engineering) – University of Bologna, Bologna, 2010.
- [40] YANG, S. J. **Low-noise electric motors.** IEE Monographs in Electrical and Electronic Engineering, Oxford University Press, 1981.
- [41] CAMERON, J. R.; THOMSON, W. T.; DOW, A. B. **Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors.** IEE Proceedings B - Electric Power Applications, v. 133, n. 3, p. 155-163, 1986.
- [42] THOMSON, W. T.; RANKIN, D.; DORREL, D.G. **On-line current monitoring to diagnose air-gap eccentricity in large three-**

- phase induction motors - industrial case histories verify the predictions.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v.14, n. 4, p.1372-1378, 1999.
- [43] THOMSON, W. T.; RANKIN, D.; DORREL, D.G. **On-line current monitoring to diagnose air-gap eccentricity – an industrial case history of a large high-voltage three-phase induction motors.** IEEE International Electric Machine and Drives Conference Record, p. MA2/4.1-MA2/4.3, 1997.
  - [44] BENBOUZID, M. E. H.; VIERA, M.; THEYS, C. **Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 14, n. 1, p. 14-22, 1999.
  - [45] BENBOUZID, M. E. H.; NEJJARI, H.; BEGUENANE, R.; VIEIRA, M. **Induction motor asymmetrical faults detection using advanced signal processing techniques.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 14, n. 2, p. 147-152, 1999.
  - [46] LE ROUX, W.; HARLEY, R. G.; HABETLER, T. G. **Detecting rotor faults in low power permanent magnet synchronous machines.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 22, n. 1, p. 322-328, 2007.
  - [47] SCHOEN, R. R.; HABETLER, T. G. **Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 31, n. 4, p. 900-906, 1995.
  - [48] OBAID, R. R.; HABETLER, T. G. **Current-based algorithm for mechanical fault detection in induction motors with arbitrary load conditions.** 38<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, p. 1347-1351, 2003.
  - [49] YAZICI, B.; KLIMAN, G. B. **An adaptive statistical time-frequency method for detection of broken bars and bearing faults in motors using stator current.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 35, n. 2, p. 442-452, 1999.
  - [50] KLIMAN, G. B.; SONG, D; KOEGL, R. A. **Remote monitoring of dc motor sparking by wavelet analysis of the current.** 4<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003, p. 25-27, 2003.

- [51] HAJI, M.; TOLIYAT, H. A. **Pattern recognition – a technique for induction machines rotor fault detection “eccentricity and broken bar fault”**. 36<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, p. 1572-1578, 2001.
- [52] TOLIYAT, H. A.; LIPO, T. A.; WHITE, J. C. **Analysis of a concentrated winding induction machines for adjustable speed drive applications. I. Motor analysis**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 6, n. 4, p. 679-683, 1991.
- [53] NANDI, S.; AHMED, S.; TOLIYAT, H. A. **Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 16, n. 3, p. 253-260, 2001.
- [54] NANDI, S.; BHARADWAJ, R. M.; TOLIYAT, H. A. **Mixed eccentricity in three phase induction machines: analysis, simulation and experiments**. 37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, p. 1525-1532, 2002.
- [55] TOLIYAT, H. A.; AREFEEN, M. S.; PARLOS, A. G. **A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 32, n. 4, p. 910-918, 1996.
- [56] AL-NUAIM, N. A.; TOLIYAT, H. A. **A novel method for modeling dynamic air-gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 13, n. 2, p. 156-162, 1998.
- [57] THOMSON, W. T.; BARBOUR, A. **On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 13, n. 4, p. 347-357, 1998.
- [58] THOMSON, W. T.; BARBOUR, A. **The on-line prediction of airgap eccentricity levels in large (MW range) 3-phase induction motors**. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'99, p. 383-385, 1999.
- [59] DEMERDASH, N. A. O.; BANGURA, J. F. **Characterization of induction motors in adjustable-speed drives using time-stepping coupled finite-element state-space method including experimental validation**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 35, n. 4, p. 790-802, 1999.

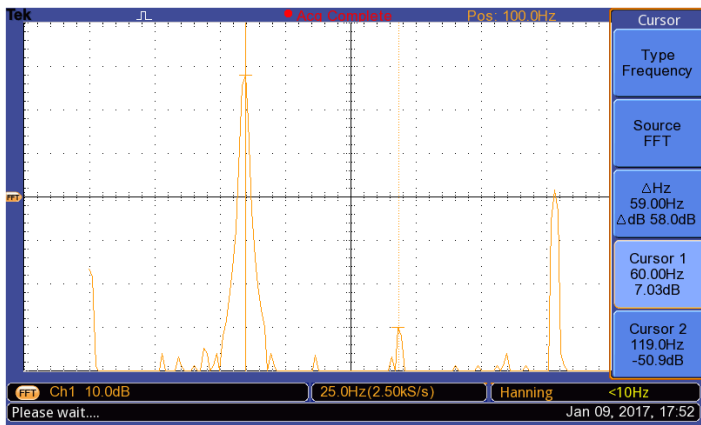
- [60] GOODE, P. V.; CHOW, M. **Using a neural/fuzzy system to extract heuristic knowledge of incipient faults in induction motors: Part I - Methodology.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 42, n. 2, p. 131-138, 1995.
- [61] GOODE, P. V.; CHOW, M. **Using a neural/fuzzy system to extract heuristic knowledge of incipient faults in induction motors: Part II - Application.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 42, n. 2, p. 139-146, 1995.
- [62] BERNIERI, A.; BETTA, G.; LIGUORI, C. **On-line fault detection and diagnosis obtained by implementing neural algorithms on a digital signal processor.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 45, n. 5, p. 894-899, 1996.
- [63] MURRAY, A.; PENMAN, J. **Extracting useful higher order features for condition monitoring using artificial neural networks.** IEEE Transactions on Signal Processing, v. 45, n. 11, p. 2821-2828, 1997.
- [64] NANDI, S.; BHARADWAJ, R. M.; TOLİYAT, H. A. **Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 17, n. 3, p. 392-399, 2002.
- [65] KLIMAN, G. B.; STEIN, J. **Methods of motor current signature analysis.** Electric Machines & Power Systems, v. 20, n. 5, p. 463-474, 1992.
- [66] LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares.** Tradução de Gustavo Guimarães Paiva. 2. ed. Porto Alegre, RS. Bookman, 2007.
- [67] SEJDIC, E.; DJUROVIC, I.; JIANG, J. **Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances.** Digital Signal Processing, v. 19, n. 1, p. 153-183, 2009.
- [68] ALLEN, J. B. **Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete Fourier transform.** IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, v. 25, n. 3, p. 235-238, 1977.
- [69] JUNG, H.; LEE, J. J.; KWON, B. H. **Online diagnosis of induction motors using MCSA.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 53, n. 6, p. 1842-1852, 2006.

- [70] GRAPS, A. **An introduction to wavelets**. IEEE Computer Science & Engineering, v. 2, n. 2, p. 50-61, 1995.
- [71] TEKTRONIX. **Digital Storage Oscilloscope: TBS 1000B-EDU series datasheet**. 2015.
- [72] LEM. **Current probe PR 30 datasheet**. 2006.

**APÊNDICE A: ESPECTRO DAS AMOSTRAS NAS FREQUÊNCIAS DE EXCENTRICIDADE**

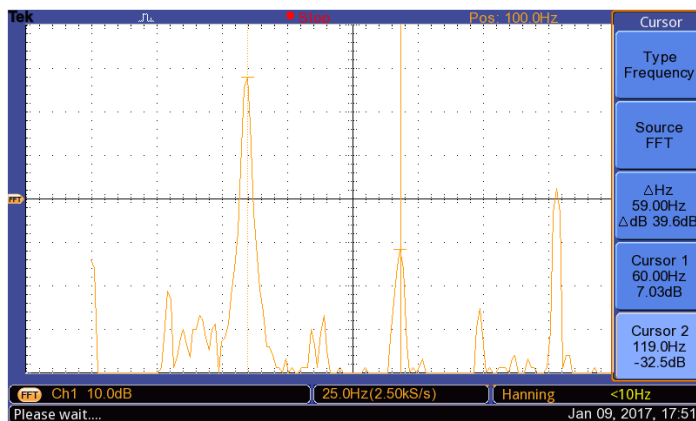
Neste apêndice são apresentadas as amplitudes das frequências de interesse, para todas as condições de excentricidade do rotor/entreferro implementadas, das amostras 2 a 4 do compressor COMPRESSOR A assim como para as amostras 1 a 5 do modelo COMPRESSOR B.

**A.1 COMPRESSOR A**



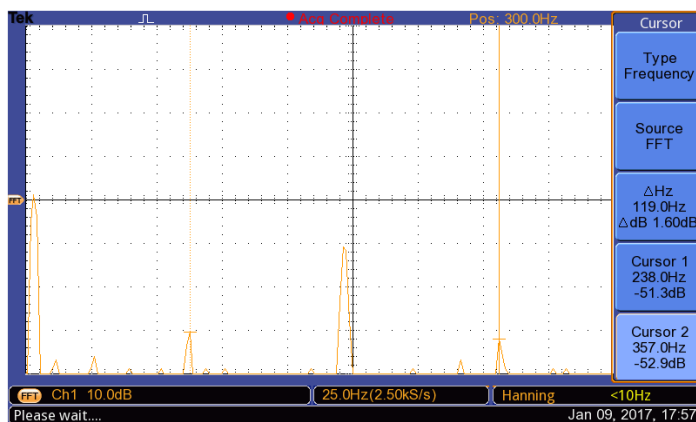
Fonte: Autor

Figura A.1 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



Fonte: Autor

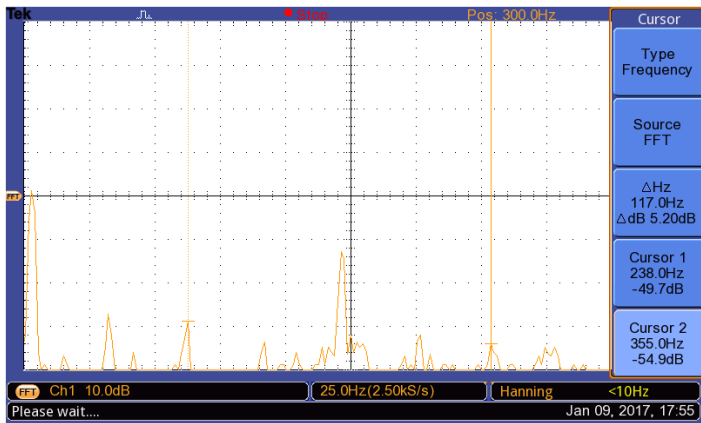
Figura A.2 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



Fonte: Autor

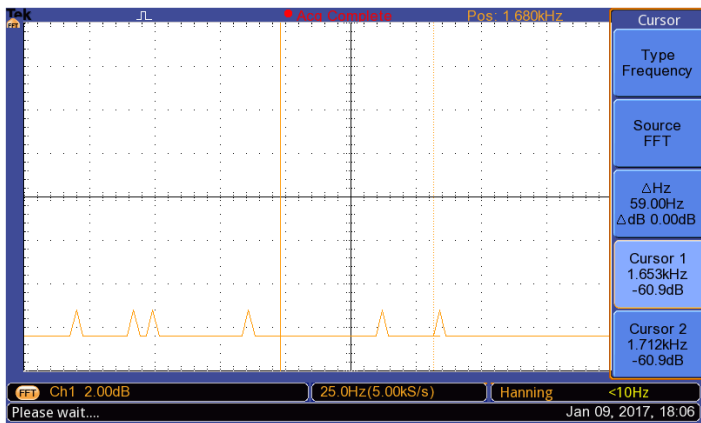
Figura A.3 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,1\%$ )





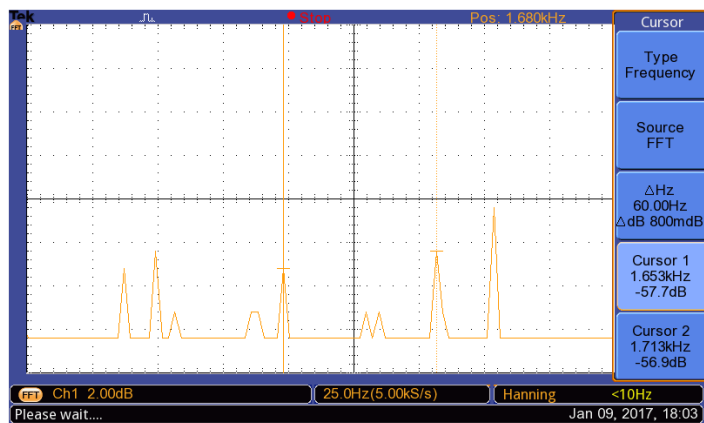
Fonte: Autor

Figura A.4 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



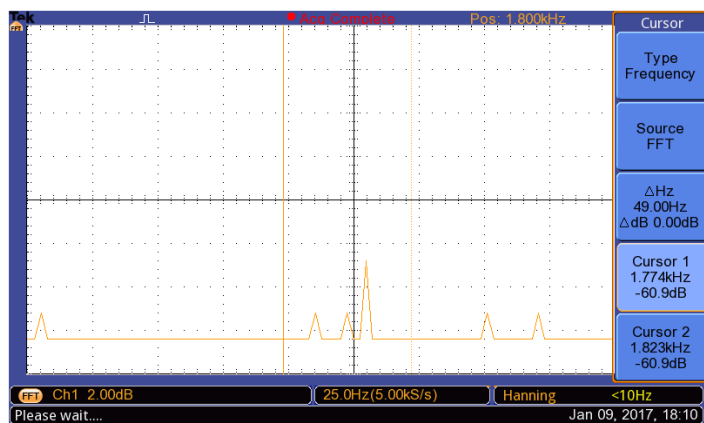
Fonte: Autor

Figura A.5 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



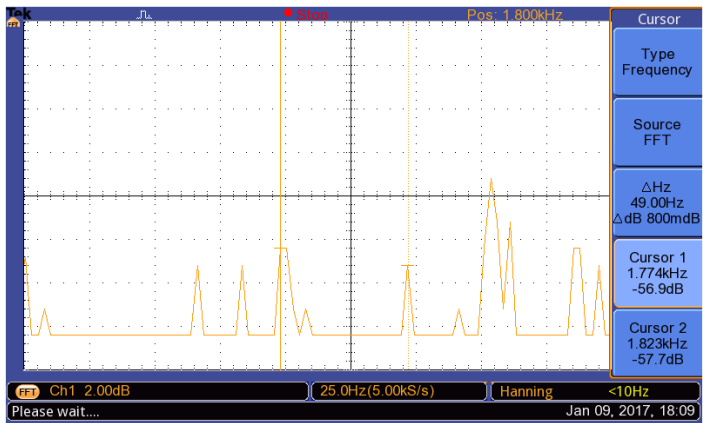
Fonte: Autor

Figura A.6 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



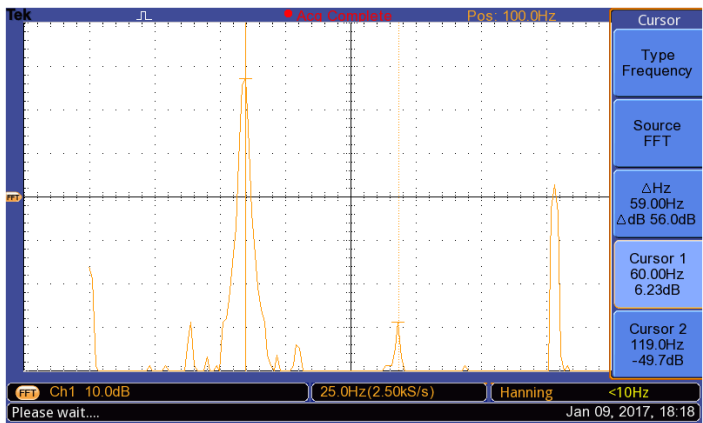
Fonte: Autor

Figura A.7 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



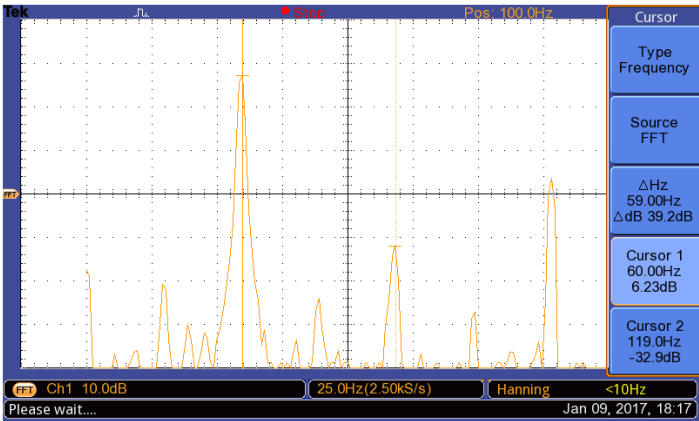
Fonte: Autor

Figura A.8 – Amostra 2 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 9,1\%$ )



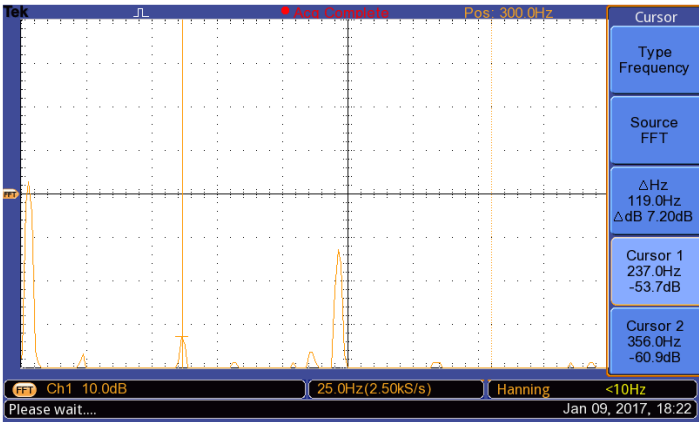
Fonte: Autor

Figura A.9 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



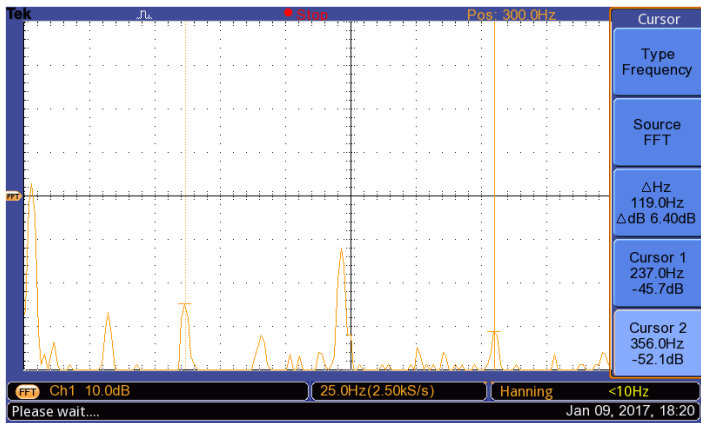
Fonte: Autor

Figura A.10 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



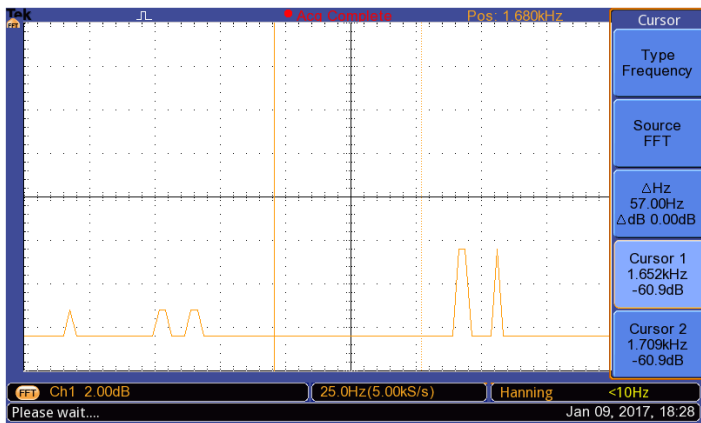
Fonte: Autor

Figura A.11 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 356 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



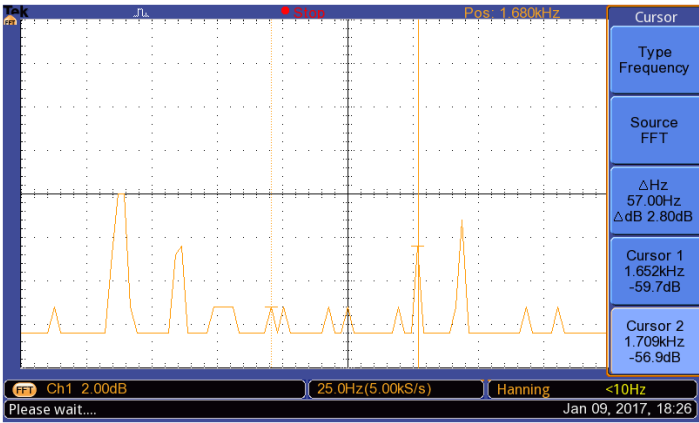
Fonte: Autor

Figura A.12 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



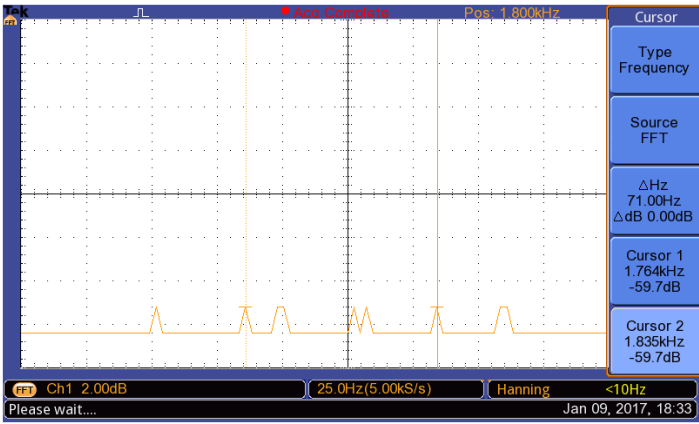
Fonte: Autor

Figura A.13 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



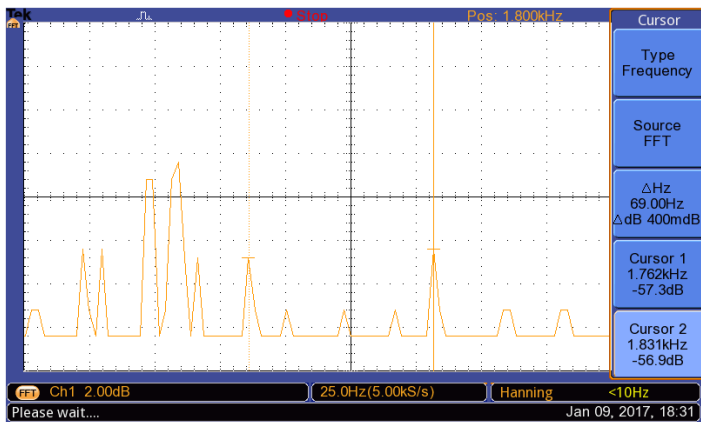
Fonte: Autor

Figura A.14 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



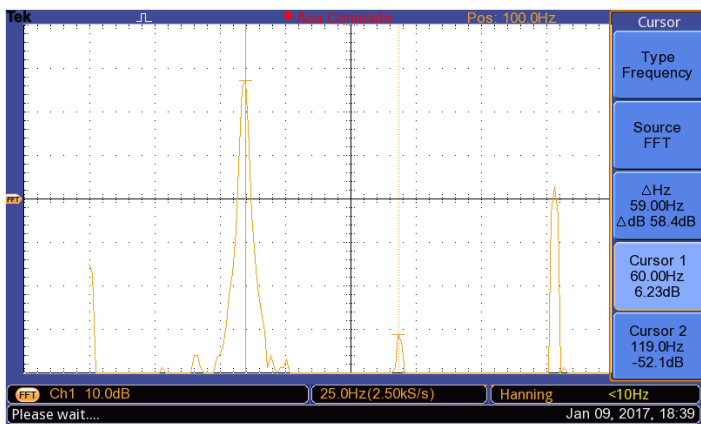
Fonte: Autor

Figura A.15 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



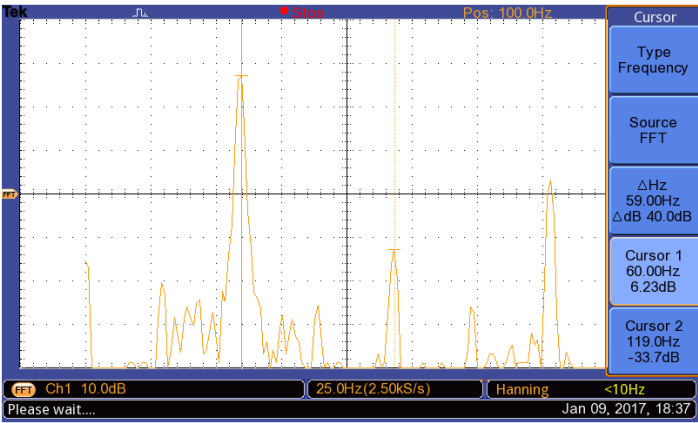
Fonte: Autor

Figura A.16 – Amostra 3 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 19,7\%$ )



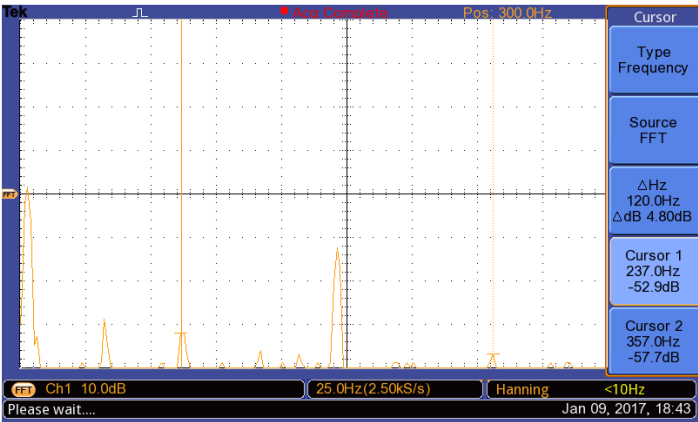
Fonte: Autor

Figura A.17 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



Fonte: Autor

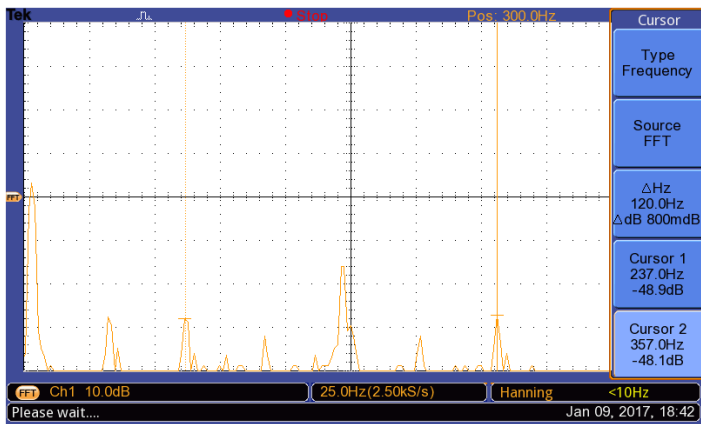
Figura A.18 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



Fonte: Autor

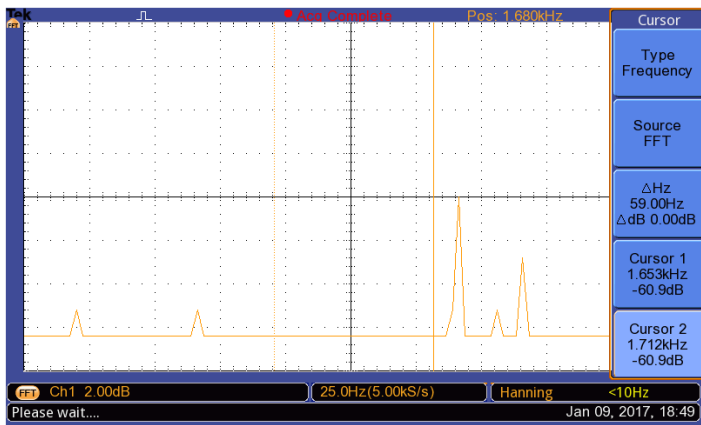
Figura A.19 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 10,9\%$ )





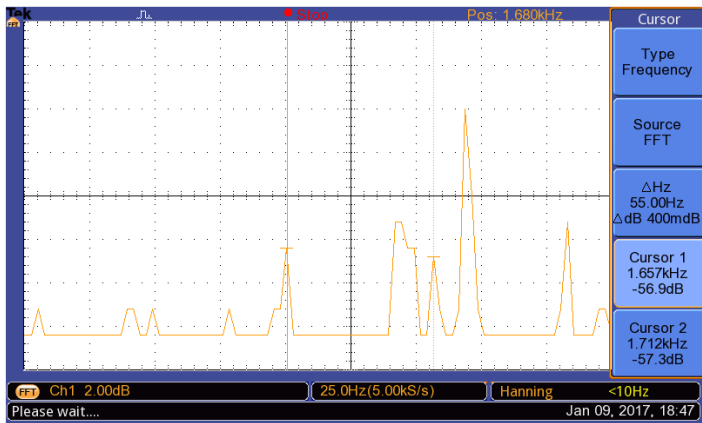
Fonte: Autor

Figura A.20 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



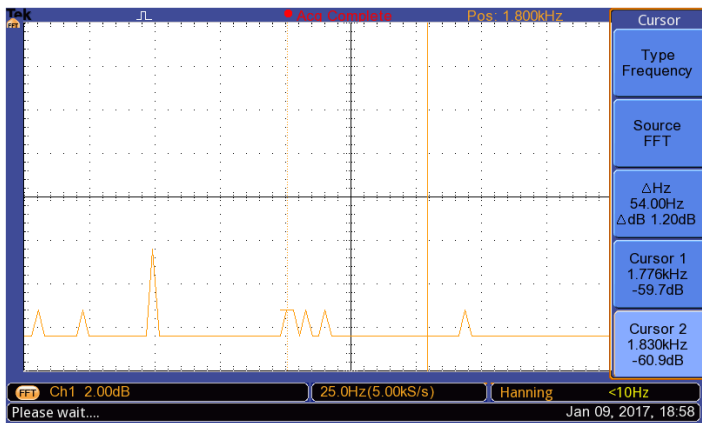
Fonte: Autor

Figura A.21 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



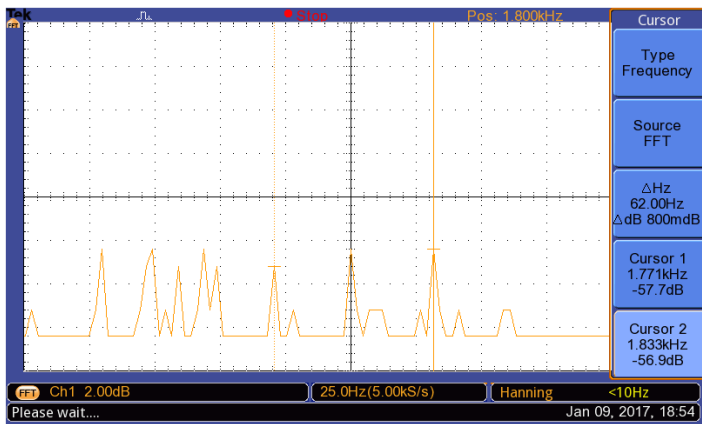
Fonte: Autor

Figura A.22 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



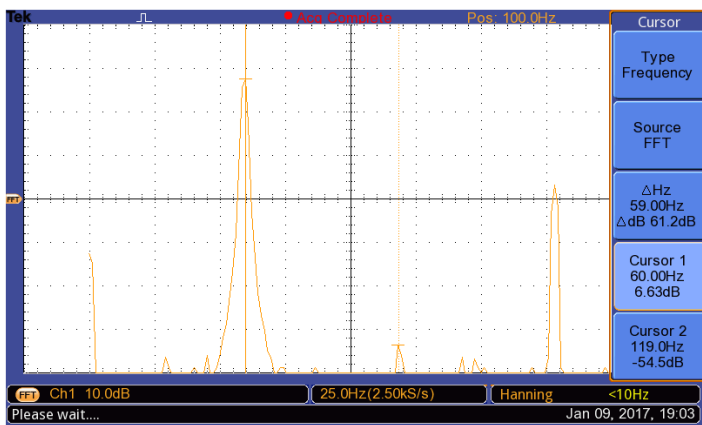
Fonte: Autor

Figura A.23 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 kHz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



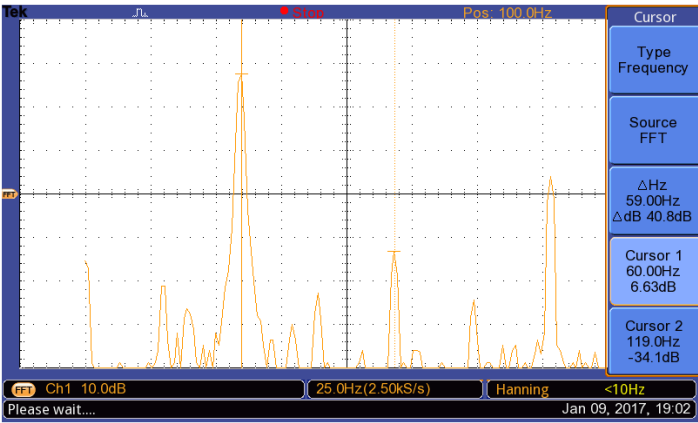
Fonte: Autor

Figura A.24 – Amostra 4 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 10,9\%$ )



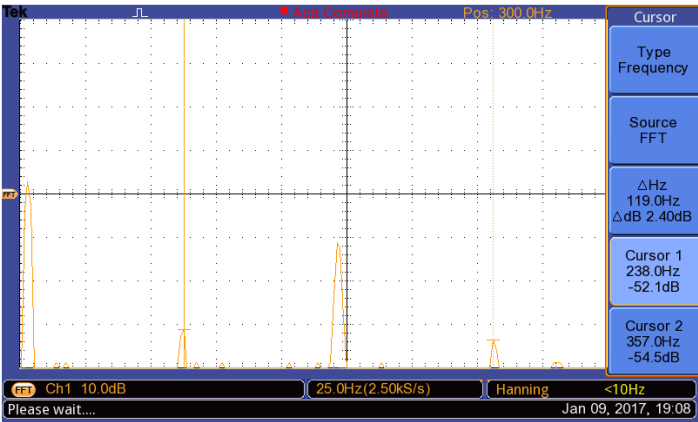
Fonte: Autor

Figura A.25 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



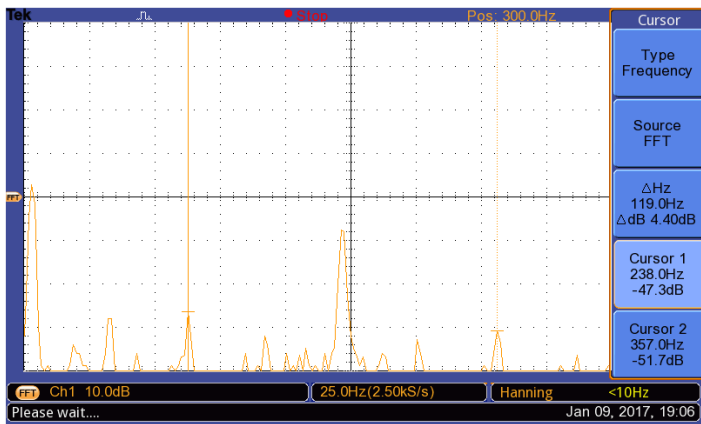
Fonte: Autor

Figura A.26 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



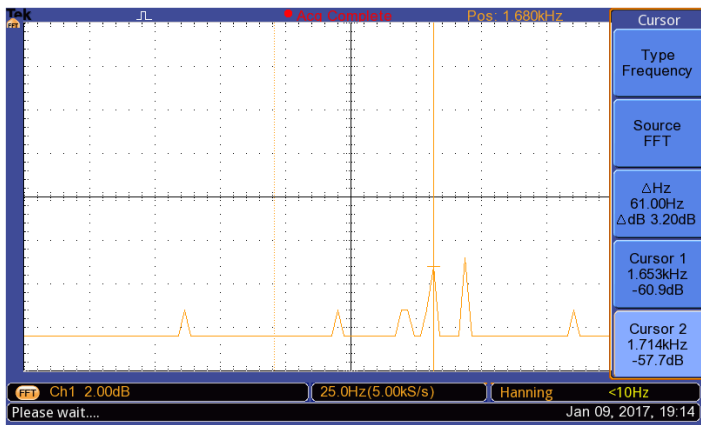
Fonte: Autor

Figura A.27 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



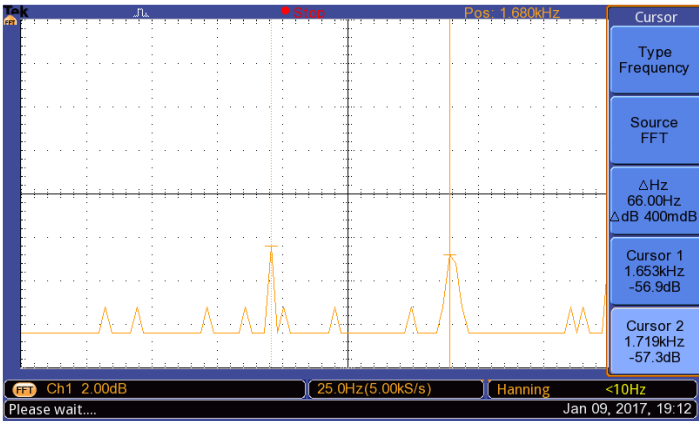
Fonte: Autor

Figura A.28 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



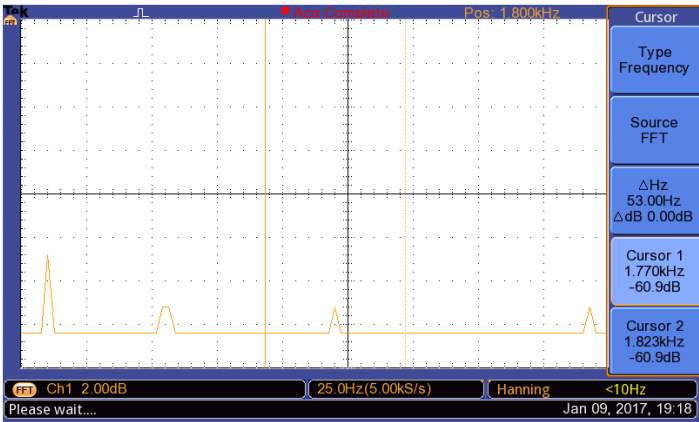
Fonte: Autor

Figura A.29 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



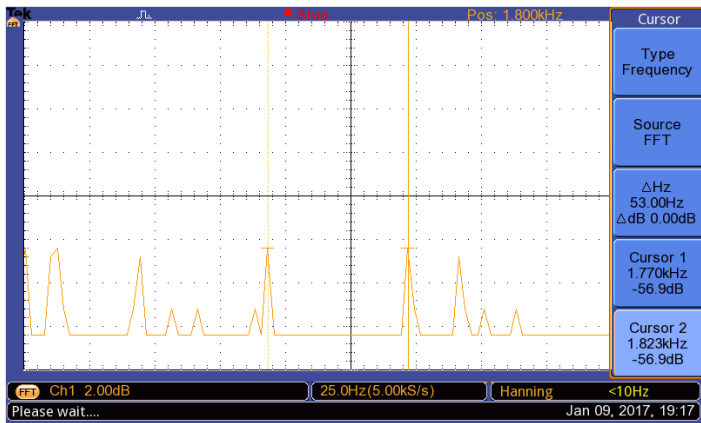
Fonte: Autor

Figura A.30 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



Fonte: Autor

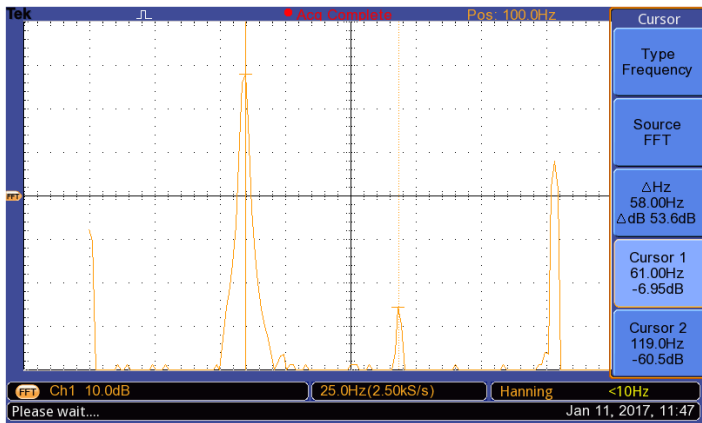
Figura A.31 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 14,1\%$ )



Fonte: Autor

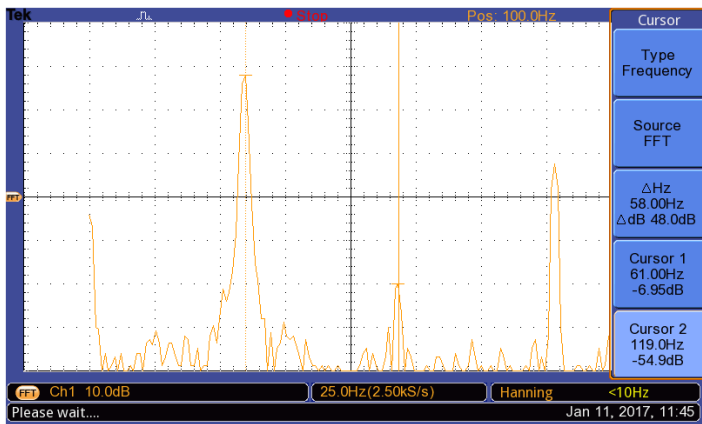
Figura A.32 – Amostra 5 COMPRESSOR A: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 52,5\%$  e  $DE = 14,1\%$ )

## A.2 COMPRESSOR B



Fonte: Autor

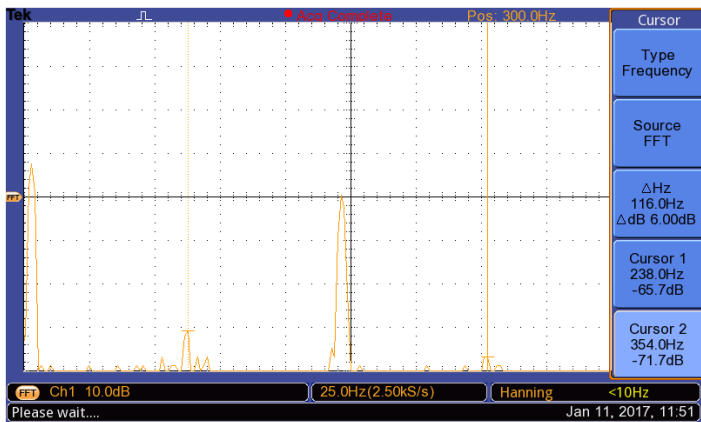
Figura A.33 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



Fonte: Autor

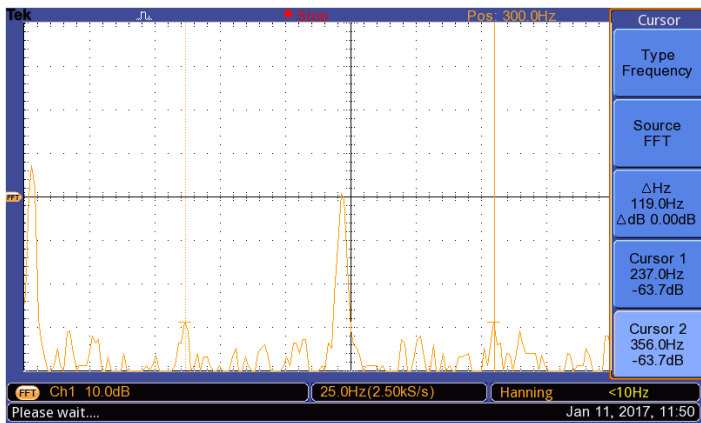
Figura A.34 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 6,2\%$ )





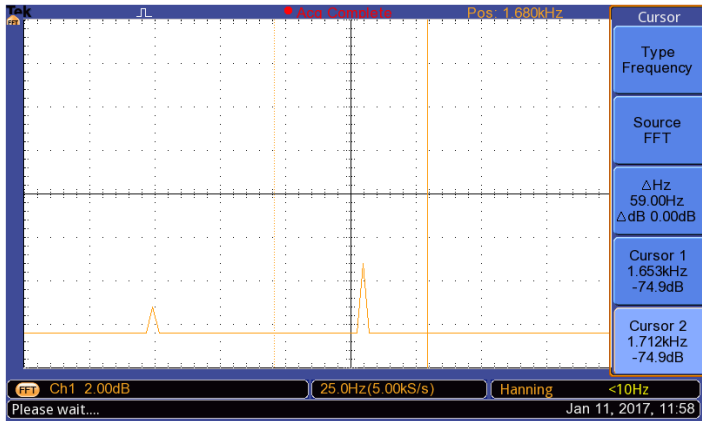
Fonte: Autor

Figura A.35 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



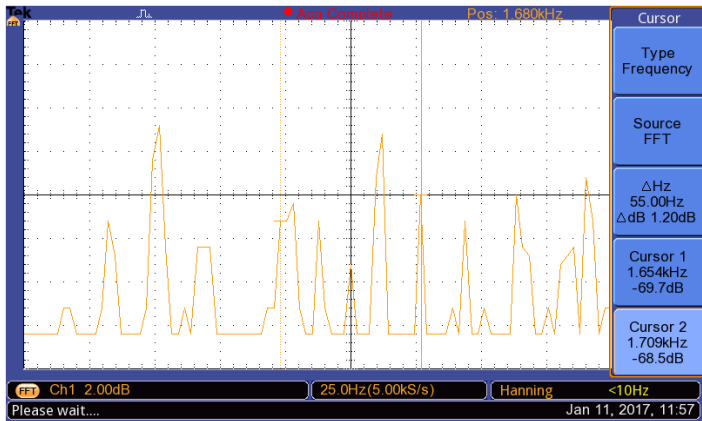
Fonte: Autor

Figura A.36 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



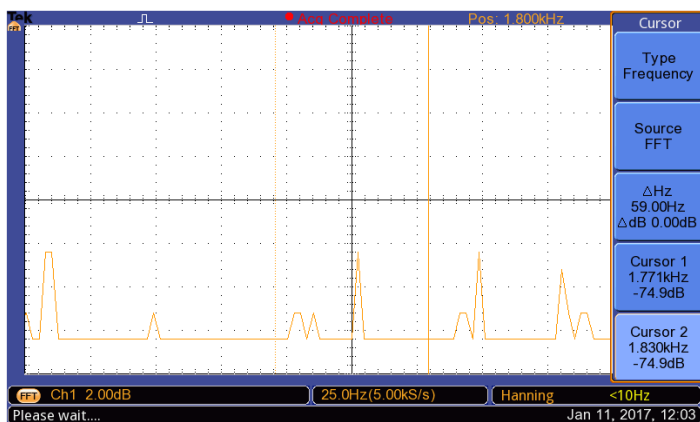
Fonte: Autor

Figura A.37 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



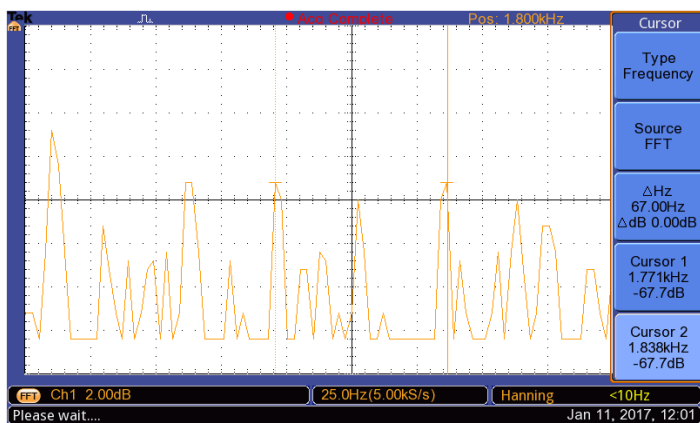
Fonte: Autor

Figura A.38 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



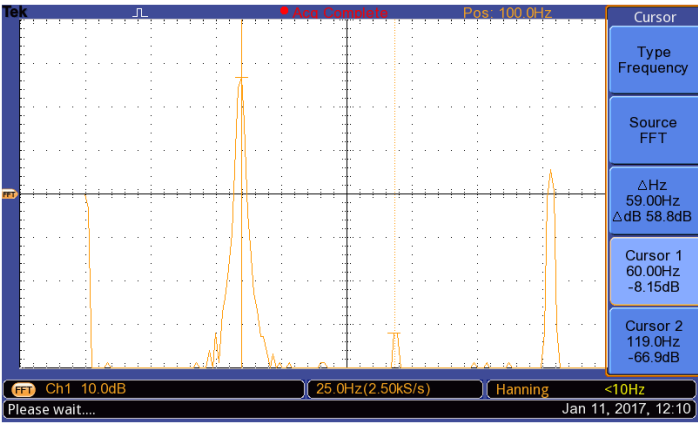
Fonte: Autor

Figura A.39 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



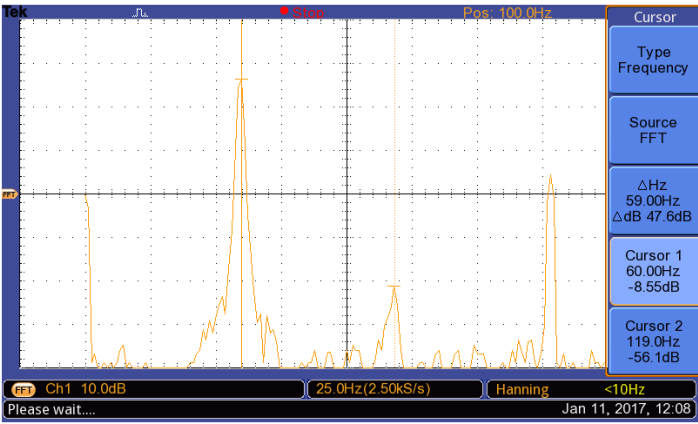
Fonte: Autor

Figura A.40 – Amostra 1 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 6,2\%$ )



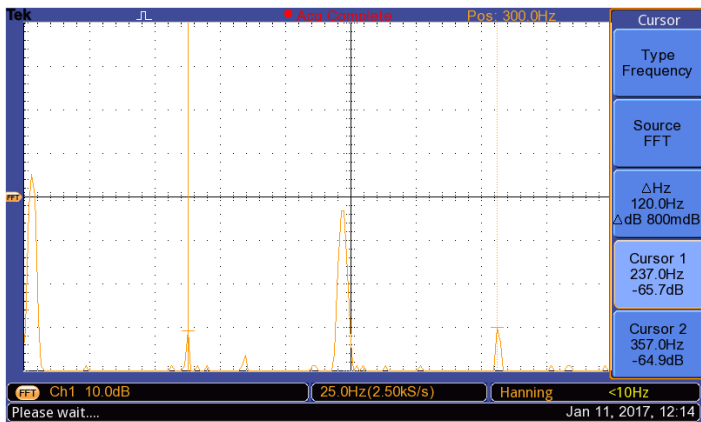
Fonte: Autor

Figura A.41 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



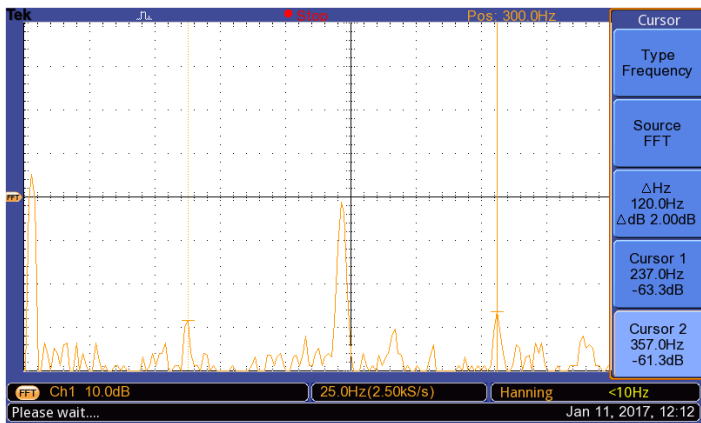
Fonte: Autor

Figura A.42 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



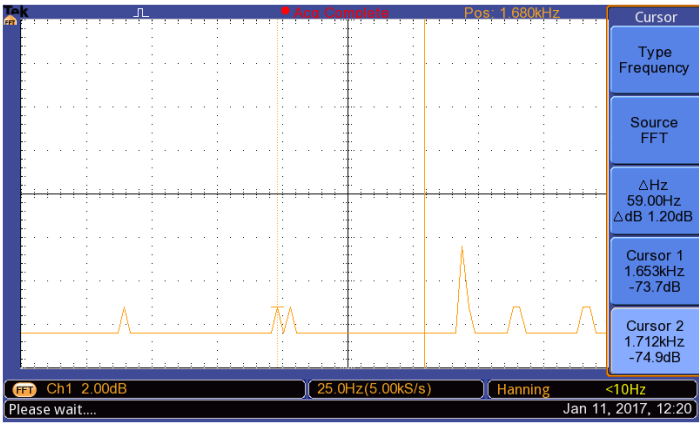
Fonte: Autor

Figura A.43 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



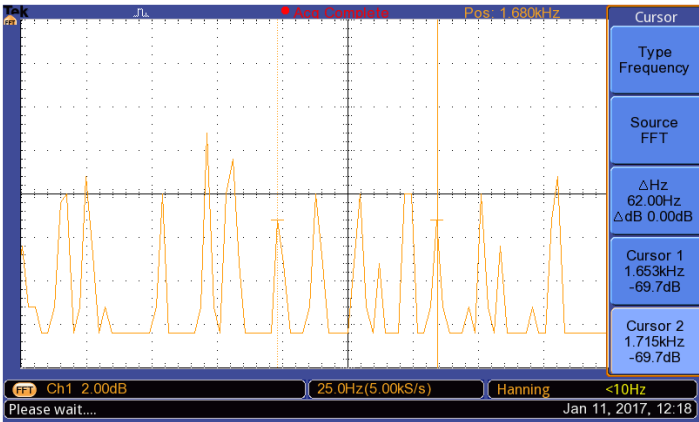
Fonte: Autor

Figura A.44 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



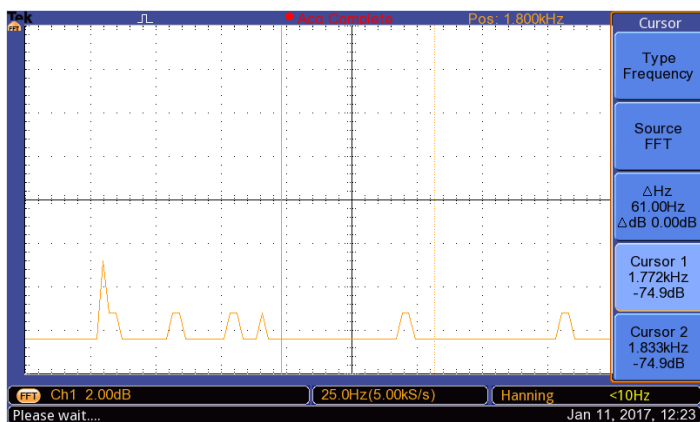
Fonte: Autor

Figura A.45 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



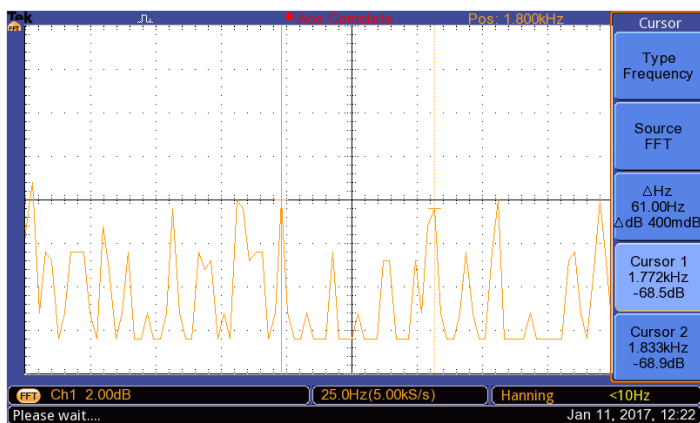
Fonte: Autor

Figura A.46 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



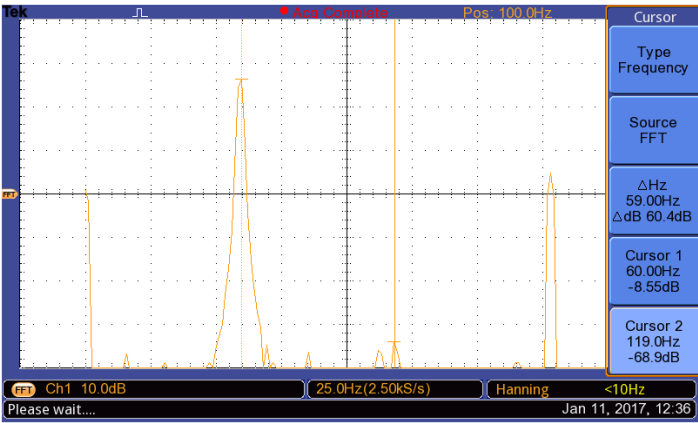
Fonte: Autor

Figura A.47 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



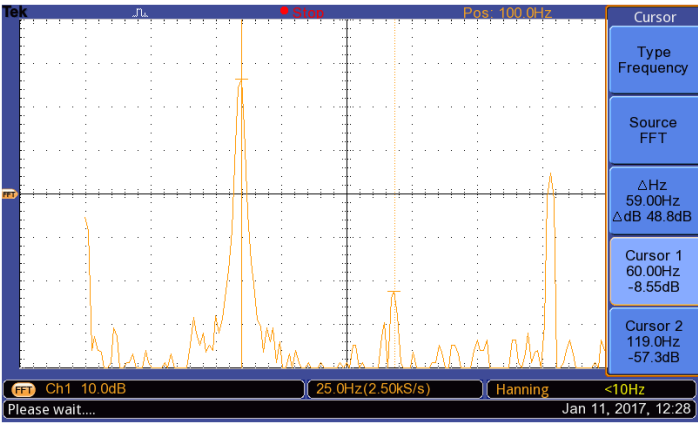
Fonte: Autor

Figura A.48 – Amostra 2 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 9,5\%$ )



Fonte: Autor

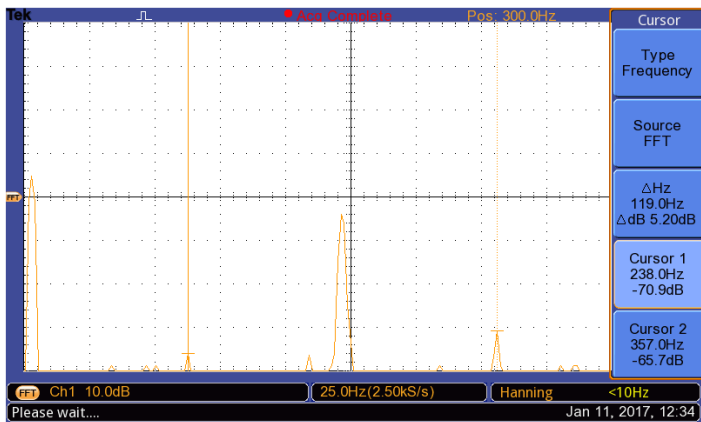
Figura A.49 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



Fonte: Autor

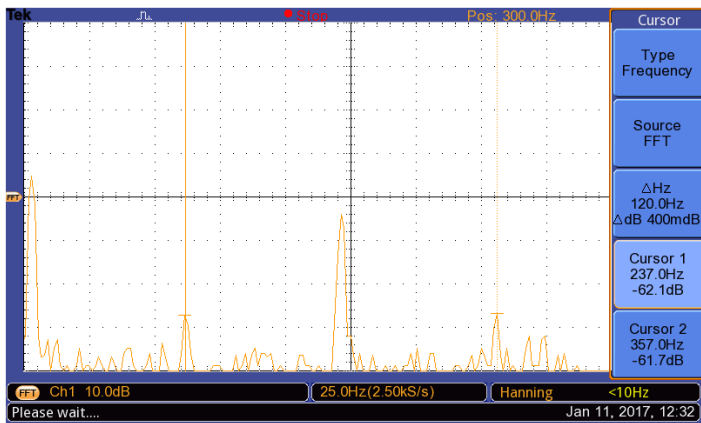
Figura A.50 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 12,0\%$ )





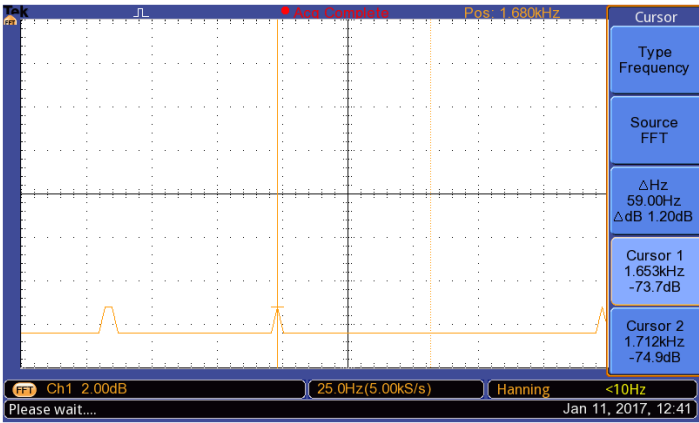
Fonte: Autor

Figura A.51 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



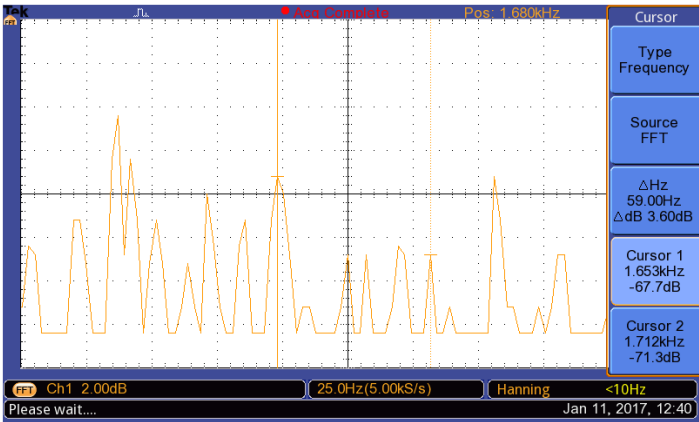
Fonte: Autor

Figura A.52 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



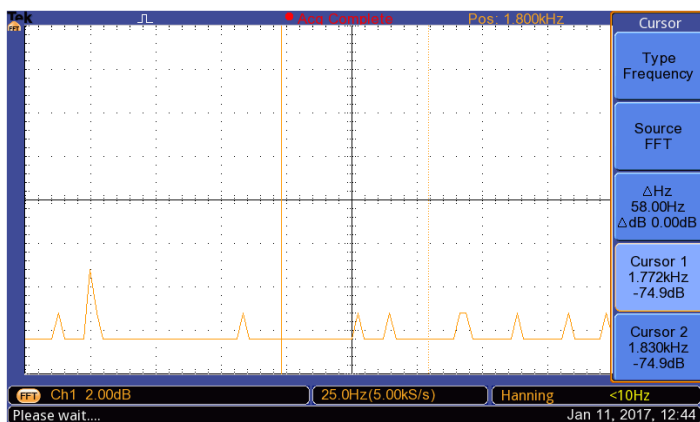
Fonte: Autor

Figura A.53 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



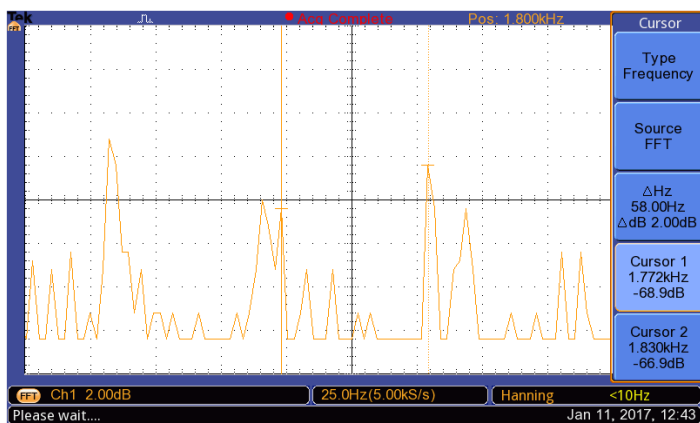
Fonte: Autor

Figura A.54 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



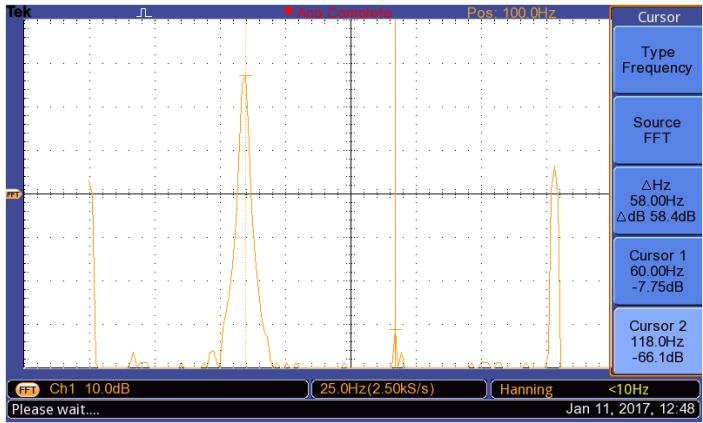
Fonte: Autor

Figura A.55 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



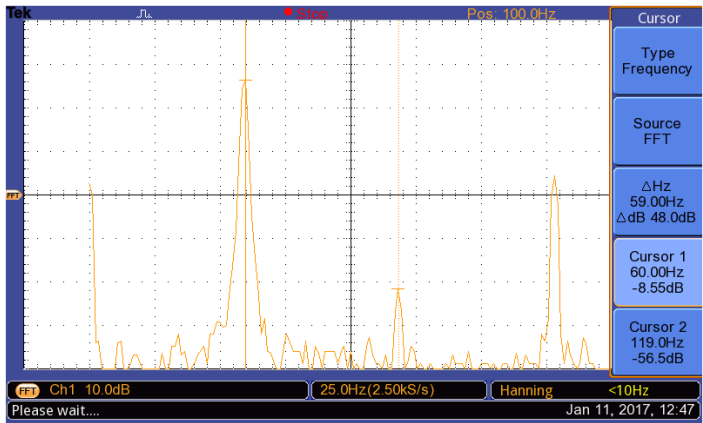
Fonte: Autor

Figura A.56 – Amostra 3 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 12,0\%$ )



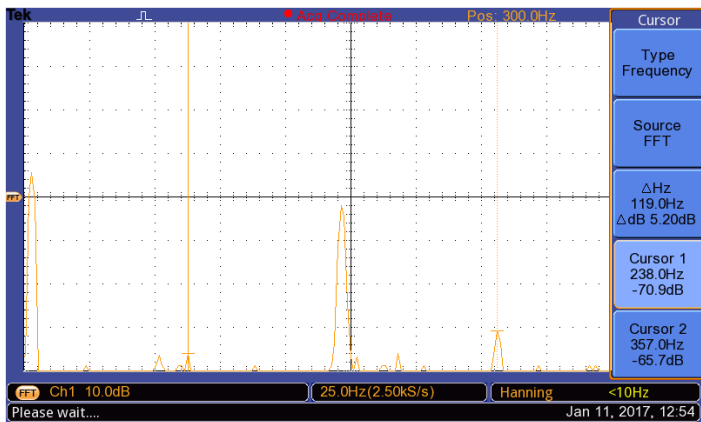
Fonte: Autor

Figura A.57 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



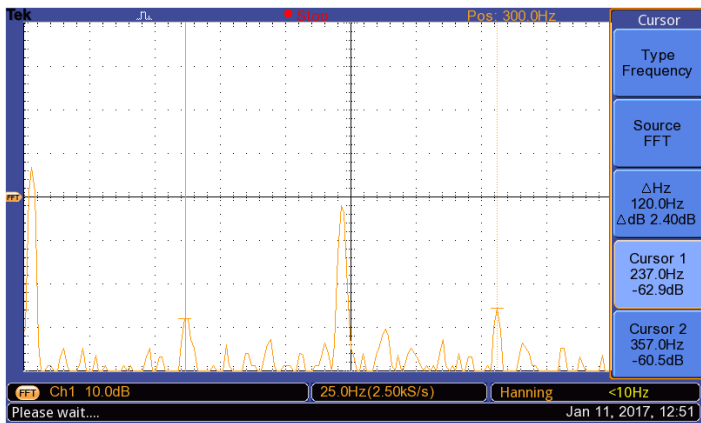
Fonte: Autor

Figura A.58 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



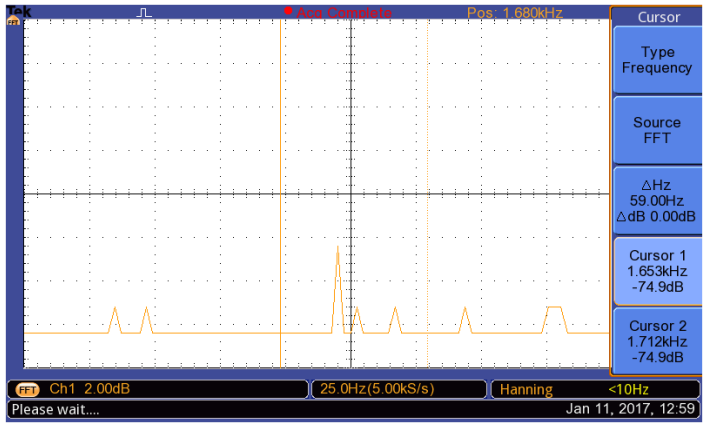
Fonte: Autor

Figura A.59 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



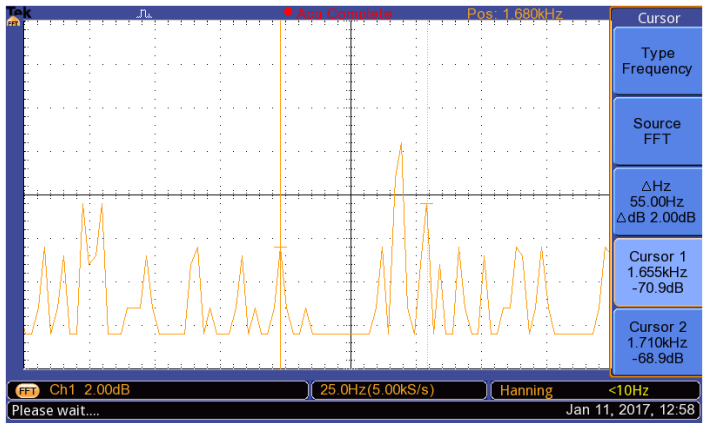
Fonte: Autor

Figura A.60 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



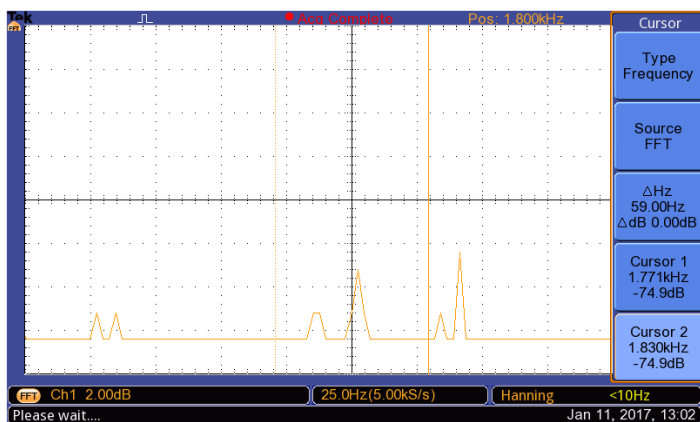
Fonte: Autor

Figura A.61 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



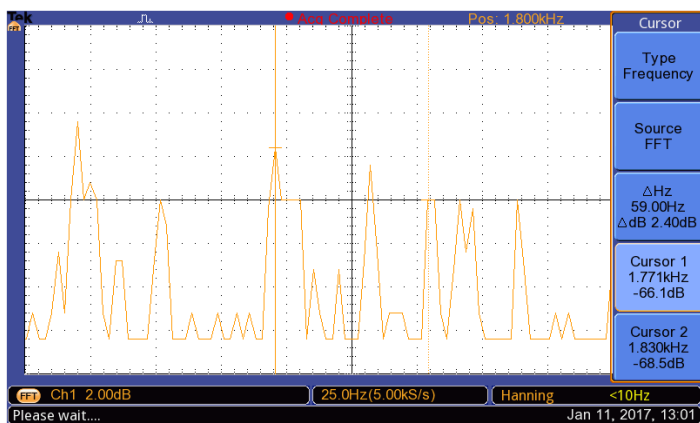
Fonte: Autor

Figura A.62 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



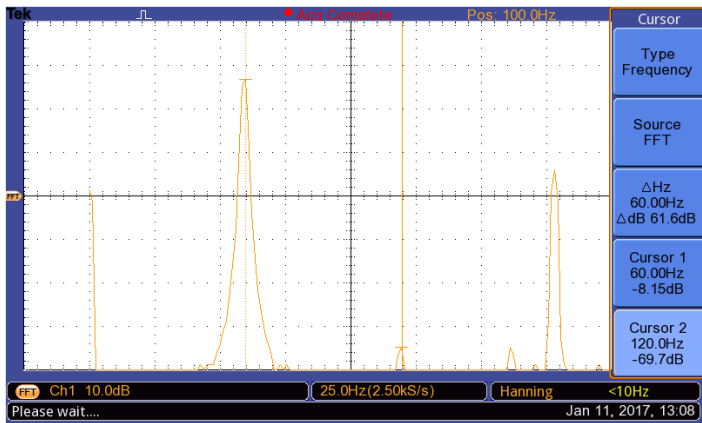
Fonte: Autor

Figura A.63 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



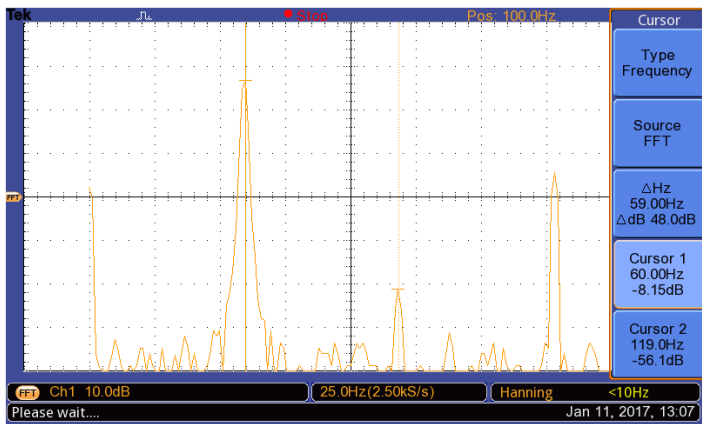
Fonte: Autor

Figura A.64 – Amostra 4 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 7,6\%$ )



Fonte: Autor

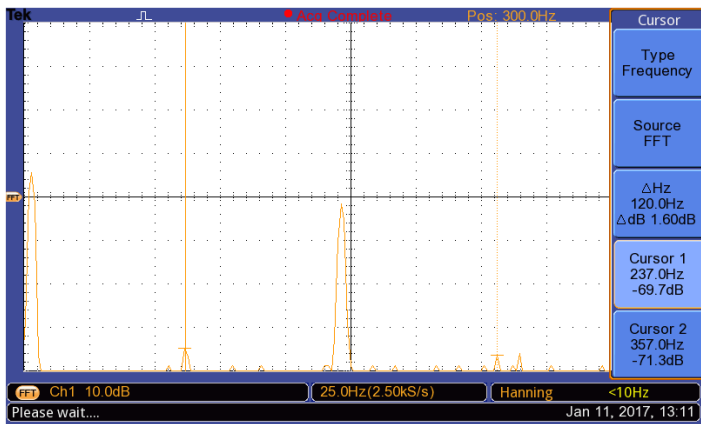
Figura A.65 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



Fonte: Autor

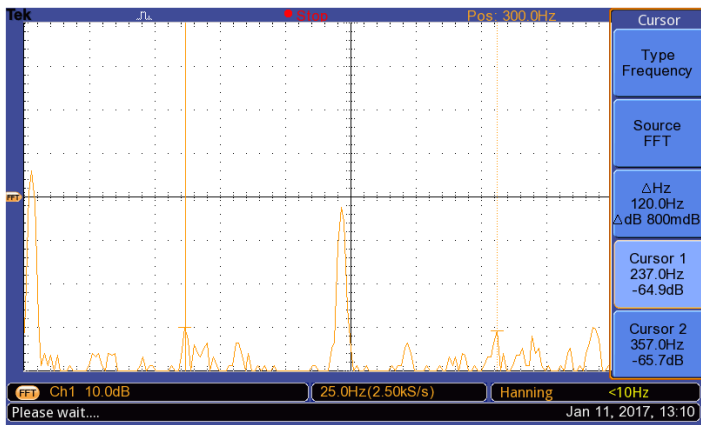
Figura A.66 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 60 Hz e 119 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 16,7\%$ )





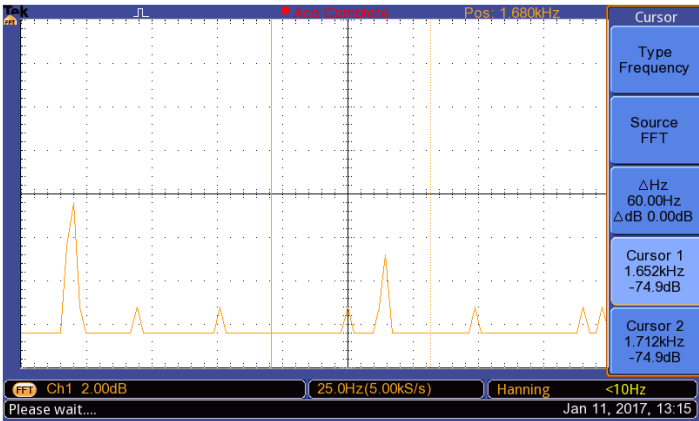
Fonte: Autor

Figura A.67 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



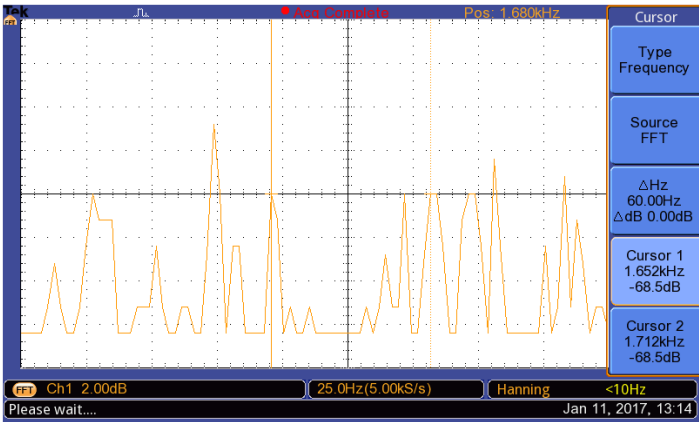
Fonte: Autor

Figura A.68 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 237 Hz e 355 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



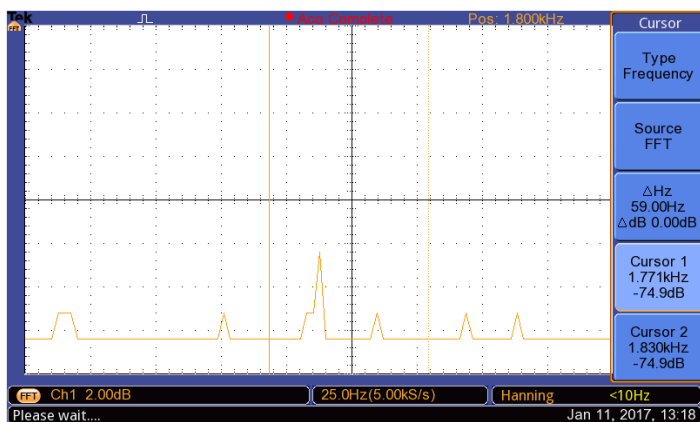
Fonte: Autor

Figura A.69 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



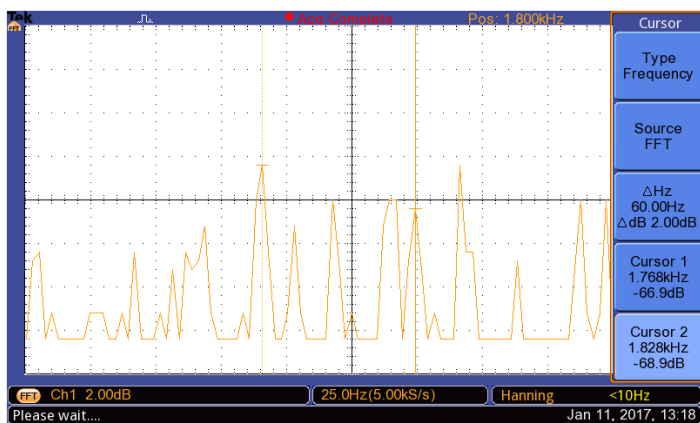
Fonte: Autor

Figura A.70 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1653 Hz e 1712 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



Fonte: Autor

Figura A.71 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 0\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



Fonte: Autor

Figura A.72 – Amostra 5 COMPRESSOR B: Espectro da corrente nas frequências de 1771 Hz e 1830 Hz ( $SE = 44,7\%$  e  $DE = 16,7\%$ )



## **APÊNDICE B: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E TOPOLOGIAS DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS**

### **B.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO**

Um motor de indução monofásico, quando conectado no sistema de alimentação comercial cujo fornecimento de energia é senoidal, apresenta nos enrolamentos do seu estator uma corrente elétrica também senoidal. O campo magnético gerado pela circulação dessa corrente apresenta ao longo do entreferro uma distribuição espacial muito próxima de uma senóide, consequência da topologia de enrolamento distribuído, isto é, enrolamentos que se estendem por diversas ranhuras ao redor da periferia do entreferro. A amplitude desse campo varia ao longo do tempo também de maneira senoidal, pois, depende diretamente da corrente que o gerou. O campo criado é então um campo estacionário do tipo pulsante, que induzirá tensão e correntes no rotor. Esse campo ou Força Magnetomotriz (FMM) estacionária e pulsante pode ser decomposta em duas ondas girantes, sendo que uma delas gira no sentido horário (para frente) e outra no sentido anti-horário (para trás).

Com o rotor em repouso, as ondas de fluxo no entreferro para frente e para trás, criadas pelas FMMs combinadas das correntes do estator e do rotor, são iguais. Consequentemente, os conjugados componentes são iguais e nenhum conjugado de partida é produzido [20]. O motor de indução monofásico não consegue partir sozinho, acelerar e atingir a rotação nominal de trabalho. Deste modo se faz necessária a inclusão de dispositivos auxiliares de partida no circuito.

Uma vez que o motor começa a girar, observa-se que o torque fornecido pelo motor no sentido de rotação é maior que o torque exercido no sentido contrário, ou seja, o motor passa a fornecer um torque acelerante [1]. Portanto, com o rotor em movimento, o conjugado do campo para frente é maior e o do campo para trás menor, sendo que na região normal de funcionamento o campo para frente é diversas vezes maior do que o campo para trás [20].

### **B.2 TOPOLOGIAS E PARTIDA DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO**

Para que um motor de indução monofásico consiga partir é necessário a inserção de dispositivos auxiliares no circuito, como mencionado na seção anterior. O principal dispositivo empregado é a inclusão de um enrolamento auxiliar, que pode atuar somente na partida ou ficar conectado permanentemente no circuito.

Os motores de indução monofásicos são classificados de acordo com os seus métodos de partida e usualmente são referidos por nomes que descrevem esses métodos [20]. Existem 4 (quatro) classificações para a partida do motor de indução monofásico que serão descritas a seguir.

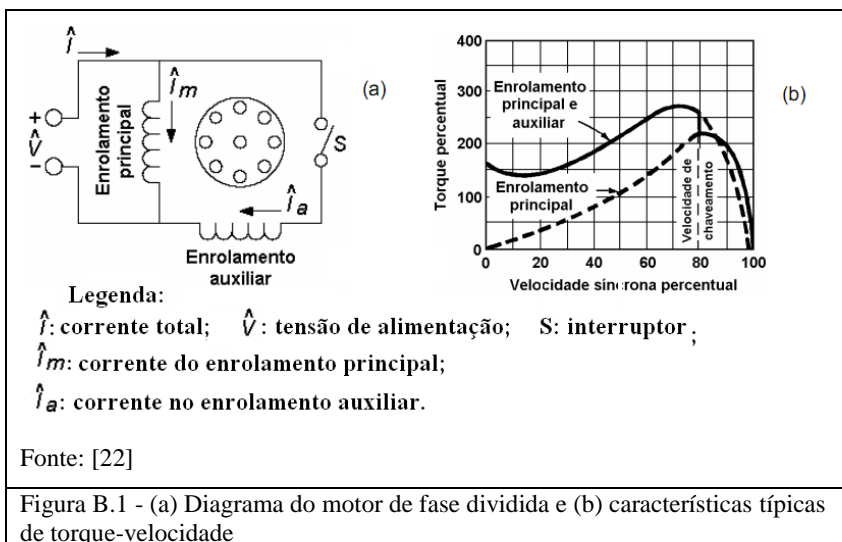
#### B.2.1 Motor de fase dividida ou fase auxiliar

Possui dois enrolamentos no estator deslocados de  $90^\circ$  elétricos no espaço, ligados em paralelo (Figura B.1 a). O enrolamento auxiliar, usado só na partida, tem mais espiras e é enrolado com um fio mais fino, em relação ao enrolamento principal, sendo colocado no topo das ranhuras [21]. Com essa construção o enrolamento de partida tem uma resistência elevada e uma baixa reatância, ao contrário do enrolamento de funcionamento que tem baixa resistência e elevada reatância.

O enrolamento auxiliar é projetado apenas para funcionar na partida e, se não for desligado do circuito, sua resistência elevada aumentará a temperatura do estator, podendo queimar ambos os enrolamentos [21].

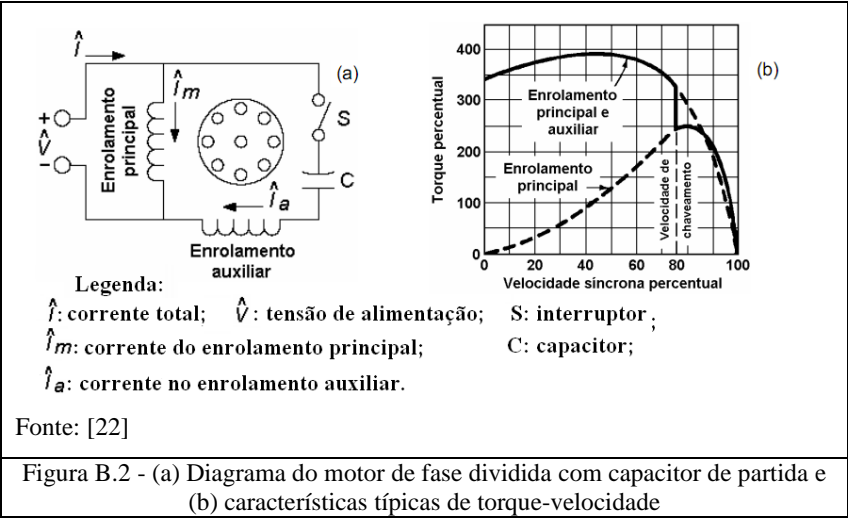
Nesse motor, o enrolamento auxiliar é removido do circuito através do interruptor ( $S$ ) após a partida do motor. Motores industriais utilizam normalmente chaves centrífugas, os quais abrem o circuito após o motor atingir certa frequência rotacional [22]. No caso de compressores para refrigeração ao invés de chaves centrífugas são utilizados relés de corrente, *PTC* (*Positive Temperature Coefficient*) ou *TSD* (*Time Starting Device*).

Os motores que utilizam esse arranjo costumam ter torque de partida moderado com baixa corrente de partida (Figura B.1 b).



### B.2.2 Motor de fase dividida com capacitor de partida

O motor com partida a capacitor é também um motor de fase dividida (Figura B.2 a), mas o deslocamento de fase no tempo entre as duas correntes é obtido por meio de um capacitor ( $C$ ) em série com o enrolamento auxiliar [21]. O capacitor tem como funções o deslocamento de fase no tempo entre as correntes dos dois enrolamentos e melhorar o desempenho de partida. Esses motores são utilizados, normalmente, em cargas com elevado torque e partida difícil (Figura B.2 b) [20].



B.2.3 Motor de fase dividida com capacitor permanente

Neste caso, o capacitor não é removido do circuito, não existindo o interruptor ( $S$ ) (Figura B.3 a). O fator de potência, o rendimento e o conjugado podem ser melhorados, já que o enrolamento auxiliar e o capacitor podem ser projetados para perfeita operação bifásica para qualquer carga desejada [21]. No entanto possui torque de partida relativamente baixo (Figura B.3 b).

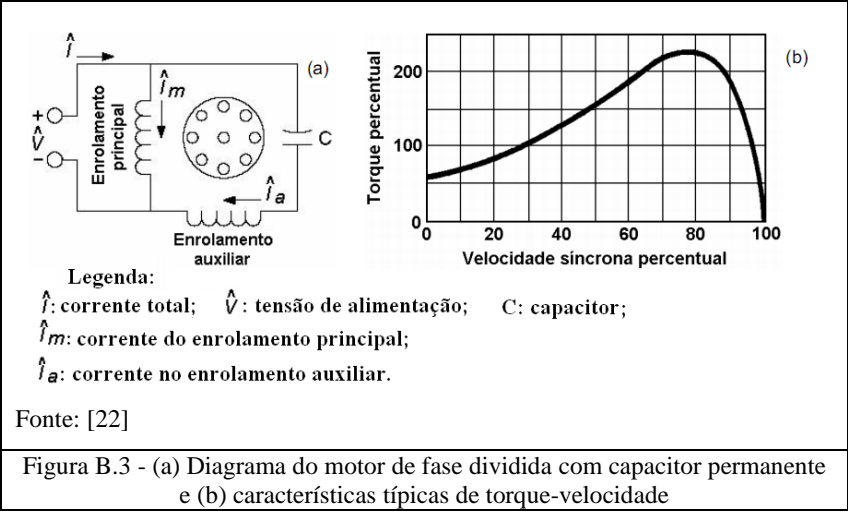


Figura B.3 - (a) Diagrama do motor de fase dividida com capacitor permanente e (b) características típicas de torque-velocidade



### B.2.4 Motor de fase dividida com dois capacitores

Como o próprio nome sugere, temos a presença de 2 (dois) capacitores no circuito (Figura B.4 a).

Associa as características de alto torque de partida do motor com capacitor de partida com as características de ótimo funcionamento do motor com capacitor permanente (Figura B.4 b). É o mais caro dos quatro. Na partida é usado um capacitor eletrolítico, e em funcionamento, um capacitor a óleo, com capacitância de 10 a 15 vezes menor que a do capacitor eletrolítico.

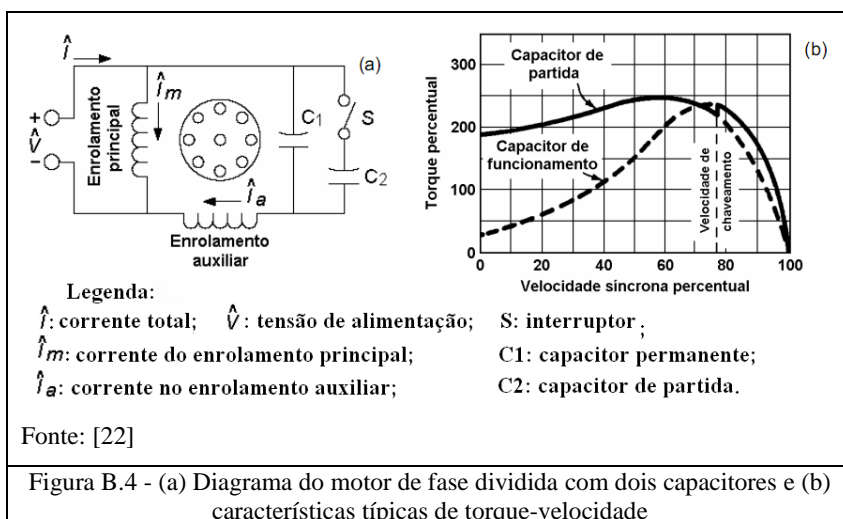


Figura B.4 - (a) Diagrama do motor de fase dividida com dois capacitores e (b) características típicas de torque-velocidade